

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA ELECTRÓNICA



TÍTULO

**“DISEÑO DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA MEJORAR LA
EFICIENCIA EN EL PROCESO DE TRASIEGO DEL AREA DE DESPACHO
DE OXIGENO LIQUIDO EN LA EMPRESA MESSER GASES DEL PERU
S.A”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

AREA: AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

**AUTORES: Br. ERICK RAÚL RENGIFO PUERTAS
Br. JUAN DANIEL TORRES ARGOMEDO**

ASESOR: ING. LUIS ALBERTO VARGAS DIAZ

TRUJILLO – PERÚ

2014

**“DISEÑO DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA MEJORAR LA EFICIENCIA EN EL PROCESO DE
TRASIEGO DEL AREA DE DESPACHO DE OXIGENO LIQUIDO EN LA EMPRESA MESSER
GASES DEL PERU S.A”**

Autores:

Br. Erick Raúl Rengifo Puertas

Br. Juan Daniel Torres Argomedo

Aprobada Por:

Ing. SAUL NOE, LINARES VERTIZ
CIP N° 142213
Presidente

Ing. LENIN HUMBERTO, LLANOS LEON
CIP N° 139213
Secretario

Ing. OSCAR, DE LA CRUZ RODRIGUEZ
CIP N° 85598
Vocal

Ing. LUIS ALBERTO, VARGAS DIAZ
CIP N° 104175
Asesor

PRESENTACIÓN

Señores Miembros del Jurado:

De acuerdo a lo establecido por el reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego, presentamos a vuestra consideración nuestra tesis titulada:

“DISEÑO DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA MEJORAR LA EFICIENCIA EN EL PROCESO DE TRASIEGO DEL AREA DE DESPACHO DE OXIGENO LIQUIDO EN LA EMPRESA MESSER GASES DEL PERU S.A”.

Con la finalidad de obtener el Título de Ingeniero Electrónico y esperando constituya una herramienta útil de consulta para quienes se interesen en este tipo de estudio.

Nuestra investigación se ha desarrollado de acuerdo a las necesidades de la empresa en estudio, realizado un diseño de sistema de control automático y aplicando nuestros conocimientos, esfuerzos e investigación.

Esperamos haber dado cumplimiento y satisfacción a las expectativas y que este trabajo de investigación sirva de guía o referencia para el desarrollo de futuras investigaciones.

Trujillo, Diciembre 2014

DEDICATORIA

A mis Padres:

Enma María Puertas

Teófilo Erasmo E.

Que con su educación y fortaleza fue el esfuerzo y la razón, para poder cumplir mi meta.

A mi Novia:

María del Carmen Muñoz

Quien con su amor y consejos, encaminan mi vida y me dan deseos de superación para ser cada día mejor.

Erick Rengifo

A mi Madre:

Olinda Argomedo Rodriguez

Que con su apoyo incondicional, amor,
comprensión y fortaleza es el esfuerzo y la
razón, para poder cumplir mis metas.

A mi Esposa:

Mariella Contreras Pisfil

Quien con su amor y consejos, encaminan mi vida y
me dan deseos de superación para ser cada día mejor.

A mi Hijo:

Daniels Patrick Torres Contreras

Quien con su existencia llena mi vida de felicidad y es
mi fuente de inspiración para ser cada día mejor.

Daniel Torres

AGRADECIMIENTO

Este trabajo representa el término de un proyecto que no hubiese podido ser finalizado satisfactoriamente sin la ayuda de Dios.

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento, reconocimiento y cariño a nuestros padres por todo el esfuerzo que hicieron por darnos una profesión y hacer de nosotros personas de bien, gracias por los sacrificios y la paciencia que demostraron todos estos años; gracias a ustedes hemos llegado a concluir uno de los proyectos más importantes en nuestras vidas.

RESUMEN

La Empresa Messer Gases del Perú S.A se dedica a la producción de gases como el oxígeno (O₂), tanto para el rubro industrial como para el de la medicina, así también el nitrógeno (N₂) y argón (Ar) que se producen a partir de la destilación fraccionada del aire en la planta en la unidad de separación de aire (A.S.U).

Dentro de sus operaciones, en el área de despacho de oxígeno líquido se ha visto reflejado altos índices de pérdidas de producto debido a que el proceso de trasiego viene siendo realizado de manera manual por acciones de operación a tiempos no preestablecidos el cual a su vez se suma en una representación de riesgo potencial para el operador al estar en contacto directo con el producto.

El análisis demostró un porcentaje considerable de oxígeno líquido que se pierde mensualmente en cada proceso de trasiego al realizar esta actividad de manera manual por los operarios, entonces basándonos en el estudio del comportamiento del sistema nos trae de interés automatizar este proceso para obtener una mejora en la operación de trasiego, reduciendo notablemente el índice de pérdidas y a la vez cumpliendo las normas de seguridad respecto a la manipulación de productos criogénicos.

Se dio a conocer los conceptos básicos del sistema de control con el que cuenta la planta industrial de la empresa Messer Gases del Perú S.A, así como arquitectura de control y todo aquello que interviene en el proceso. Todo esto con el fin llegar a los objetivos planteados y la comprensión del proceso.

El sistema de control representativo está en función a valores o parámetros establecidos por diseños equivalentes a procesos unitarios que nos permite analizar el funcionamiento del proceso de trasiego de una manera característica y así poder realizar la selección de instrumentos y equipos adecuadamente.

ABSTRACT

The Empresa Messer Gases of the Peru S.A dedicates itself to the production of gases like oxygen (O₂), so much for the industrial item as well as for the one belonging to the medicine, that way also nitrogen (N₂) and argon (Ar) that are produced as from the fractioned distillation of the air in the plant in the unit of separation of air (A.S.U).

Within their operations, in the area of shipment of liquid oxygen it has been seen reflected tall indexes of losses of product because the process of moving comes being realized of manual way by stocks of operation at times not prestablecidos which in turn joins up in a representation of potential risk for the operator when in direct contact with the product.

The analysis demonstrated a considerable percentage of liquid oxygen that goes away monthly in each process of moving to accomplish this activity of manual way for the laborers, then basing us on the study of the behavior of the system he brings us of concern automating this process to get out an improvement in the operation of moving, reducing the rate of losses notably and at the same time keeping the security standards in relation to the manipulation of cryogenic products.

Messer Gases of the Peru S.A, told someone to know the basic concepts of the control system that you count the industrial plant of the company with himself as well as architecture of control and whatever you intervene in the process. All this with the end coming to the presented objectives and the understanding of the process.

The representative control system is in show to moral values or parameters established by equivalent designs to unitary processes that he allows us analyzing the functioning of the process of moving of a characteristic way and that way could have accomplished the selection of instruments and equipments adequately.

INDICE

PRESENTACIÓN.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
ÍNDICE.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
ÍNDICE DE GRAFICOS.....	XVII

I INTRODUCCIÓN

1.1 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	1
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.4 OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	2
1.4.1 Objetivo General.....	2
1.4.2 Objetivos Específicos.....	2
1.5 FORMULACIÓN DE LA HIPOTESIS.....	3
1.6 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	3
1.6.1 En lo Tecnológico.....	3
1.6.2 En lo Académico.....	3
1.6.3 En lo Social.....	3
1.6.4 En lo Económico.....	3

II FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN A LA INSTRUMENTACION.....	4
2.1.1 Simbología.....	4
2.1.1.1 Objetivos.....	4
2.1.2 P&ID.....	4
2.1.3 Norma ISA.....	5
2.2 IDENTIFICACIÓN DE UN INSTRUMENTO.....	5
2.2.1 Instrumento.....	5
2.2.2 Identificación Funcional de un Instrumento.....	5
2.2.3 Líneas y Símbolos Generales.....	6
2.2.4 Símbolos Para Válvulas de Control.....	7

2.2.5	Símbolos Para Actuadores.....	7
2.2.6	Ejemplo.....	8
2.2.7	Solución.....	9
2.2.8	SAMA.....	9
2.3	SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN.....	10
2.3.1	Sistemas en Bucle Abierto.....	11
2.3.2	Sistemas en Bucle Cerrado.....	11
2.3.3	Controladores.....	12
2.3.3.1	Control Todo o Nada.....	12
2.3.4	Control PID.....	12
2.4	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC).....	13
2.4.1	Ventajas Y Desventajas Del PLC.....	13
2.4.2	Partes De Un PLC.....	15
2.5	ARQUITECTURA DE CONTROL.....	15
2.6	SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO.....	16
2.7	BUSES DE CAMPO.....	17
2.7.1	Buses de Campo Propietario.....	18
2.7.2	Buses de Campo Abierto.....	18
2.8	PROFIBUS.....	20
2.8.1	Profibus PA.....	20
2.8.2	Profibus DP.....	21
2.8.3	Profibus FMS.....	21
2.8.4	Arquitectura Protocolar.....	21
2.8.4.1	Profibus DP.....	22
2.8.4.2	Profibus FMS.....	22
2.8.4.3	Profibus PA.....	22
2.9	HMI.....	23
2.10	SCADA.....	24
2.10.1	Concepto Básico de Sistema SCADA.....	24
2.10.2	Funciones Principales Del Sistema SCADA.....	24
2.11	TRASIEGO.....	25
2.12	TANQUE CRIOGÉNICO.....	26
2.12.1	Ventajas.....	28
2.13	BOMBAS CRIOGÉNICAS.....	28
2.13.1	Aplicaciones.....	28
2.13.2	Líquidos Trasvasados.....	28
2.13.3	Características Técnicas.....	28
2.13.4	Accesorios.....	28
2.14	OXIGENO LÍQUIDO.....	31
2.14.1	Producción de los Gases del Aire.....	31

2.14.2	Separación de los Gases del Aire.....	32
2.15	VALVULAS CRIOGÉNICAS.....	33
2.15.1	Válvulas Criogénicas Tipo Globo.....	33
2.15.1.1	Características.....	33
2.15.1.2	Materiales.....	33
2.15.1.3	BK y BKA Series de Válvulas.....	35
2.15.2	Válvulas Criogénicas Tipo Check.....	36
2.15.2.1	Características.....	36
2.15.2.2	Materiales.....	36
2.16	VARIADORES DE VELOCIDAD.....	37
2.16.1	El Convertidor de Frecuencia.....	38
2.16.2	Selección de un Variador de Velocidad.....	39
2.16.3	Circuito Recomendado.....	40
2.17	TERMOCUPLAS.....	43
2.17.1	Tipos de Termocuplas.....	43
2.17.2	Características de las Termocuplas.....	44
2.17.3	Termoresistencias (RTD).....	44
2.17.3.1	PT-100.....	45
2.17.3.1.1	Modelos de Conexión de un PT-100.....	45
2.17.3.1.2	Cualidades de una Termocupla.....	47
2.17.3.1.3	Cualidades de un RTD.....	47
2.18	TRANSMISORES.....	47
2.18.1	Modelo 1151.....	47
2.18.2	Modelo 3051.....	48
2.19	CRIOGENIA.....	49
2.19.1	Acumulación de Refrigeración con Empleo de Intercambiadores de Calor...49	49
2.19.2	Sistema de Linde de Columna Simple para la Separación del Aire.....49	49
2.19.3	Sistema de Linde de Columna Doble para Separación de Aire.....50	50
2.20	SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE FLUIDOS CRIOGÉNICOS.....	51
2.21	AISLAMIENTO TERMICO.....	53
2.21.1	Aislamiento al Vacío.....	53
2.21.2	Aislamiento de Capa Múltiple.....	53
2.21.3	Aislamiento con Polvo.....	54
2.21.4	Aislamiento con Espuma.....	54
2.22	PRINCIPIO DE LAS PLANTAS SEPARADORAS DE AIRE.....	55
2.22.1	Compresión de Aire.....	55
2.22.2	Enfriamiento del Aire de Proceso.....	55
2.22.3	Sistema de Purificación del Aire.....	55
2.22.4	Enfriamiento del Aire a La Temperatura de Licuación.....	55
2.22.5	Producción de Frio.....	56

	2.22.6 Licuación.....	56
	2.22.7 Fraccionamiento del Aire (Rectificación).....	56
2.23	EL AIRE.....	56
	2.23.1 Propiedades físicas del aire	57
	2.23.2 Propiedades Químicas del Aire.....	57
	2.23.3 Aplicaciones de los Gases del Aire.....	58
2.24	OXIGENO.....	58
	2.24.1 Aplicaciones del Oxígeno a Nivel Industrial.....	60
	2.24.2 Efectos Fisiológicos del Oxígeno.....	60
	2.24.3 Almacenamiento del oxígeno.....	61
	2.24.4 Manipulación del oxígeno.....	61
2.25	TRANSFERENCIA DE CALOR.....	62
	2.25.1 Conducción.....	62
	2.25.2 Convección.....	63
	2.25.3 Radiación.....	64
2.26	IMPORTANCIA DE LOS PROGRAMAS DE INGENIERÍA EN LA INDUSTRIA.....	64
2.27	FLUIDOS INCOMPRESIBLES EN LA INDUSTRIA.....	64
	2.27.1 Oxígeno en Estado Líquido.....	65
	2.27.2 Agua de Proceso.....	65
	2.27.3 Agua de Servicio.....	65
	2.27.4 Combustibles Líquidos.....	65
	2.27.5 Propiedades Físicas.....	66
	2.27.5.1 Densidad.....	67
	2.27.5.2 Gravedad Especifica.....	67
	2.27.5.3 Porcentaje de Flujo de Sobrediseño.....	67
	2.27.6 Pérdidas de Energía	68
	2.27.6.1 Perdidas de Energía Primaria.....	71
	2.27.6.2 Perdidas de Energía Secundaria.....	73
	2.27.6.3 Método De Longitudes Equivalentes.....	74
	2.27.6.4 Método de Coeficientes de Resistencia, K	77
	2.27.6.5 Efectos de la Velocidad le los Fluidos Incompresibles en Tuberías.....	80
	2.27.7 Efecto de la Caída de Presión de los Fluidos Incompresibles en Tuberías.....	82
2.28	SISTEMAS DE TUBERÍAS DE PROCESOS Y BOMBAS CENTRÍFUGAS EN PLANTAS INDUSTRIALES.....	82
	2.28.1 Sistemas de Inducción.....	85
	2.28.1.1 Efectos de la Presión de Vapor.....	89
	2.28.1.2 Efectos de la Cavitación.....	89
	2.28.1.3 Carga Neta Positiva de Succión, N_{psh}	91

	2.28.1.4	Carga Neta Positiva de Succión Requerida, <i>N_{pshr}</i>	91
	2.28.1.5	Carga Neta Positiva de Succión Disponible, <i>N_{pshd}</i>	91
	2.28.1.6	Curvas Características de una Bomba Centrífuga.....	95
	2.28.1.7	Presión de Succión.....	96
	2.28.2	Sistema de Descarga.....	97
	2.28.2.1	Presión de Descarga.....	98
	2.28.3	Equipo de Bombeo.....	98
2.29		SISTEMAS DE CONTROL APACS-SIEMENS.....	101
	2.29.1	Características.....	101

III MATERIALES Y METODOS

3.1		MATERIAL.....	103
	3.1.1	Población.....	103
	3.1.2	Muestra.....	103
	3.1.3	Unidad de Análisis.....	103
	3.1.4	Material Requerido Para el Desarrollo de la Investigación.....	103
3.2		MÉTODO.....	104
	3.2.1	Tipo de Investigación.....	104
	3.2.2	Diseño de Investigación.....	104
	3.2.3	Variables de Estudio y Operacionalización.....	104
	3.2.3.1	Operacionalización de la Variable Independiente.....	104
	3.2.3.2	Operacionalización de la Variable Dependiente.....	104
	3.2.4	Instrumentos de recolección de datos.....	105
	3.2.4.1	Interpretación de Datos y Resultados.....	106
	3.2.4.2	Características del Sistema de Trasiego Operado de Manera Manual.....	106
	3.2.4.2.1	Ciclo de Enfriamiento.....	108
	3.2.4.3	Resultados Obtenidos Desde el Sistema de Control.....	110
	3.2.5	Procedimientos y Análisis de Datos.....	111
	3.2.5.1	Procedimientos.....	112
	3.2.5.1.1	Desarrollo del Proceso de Trasiego Automático.....	112
	3.2.5.1.1.1	Generalidades.....	112
	3.2.5.1.1.2	Descripción del Proceso.....	113
	3.2.5.1.1.3	Caracterización del Proceso de Trasiego Automático.....	115
	3.2.5.1.1.4	Características Generales del Proceso de Trasiego Automático.....	115

3.2.5.1.1.5	Características Técnicas de los Equipos del Proceso de Trasiego Automático.....	116
3.2.5.1.1.5.1	Válvula de Control.....	116
3.2.5.1.1.5.2	El Posicionador de Válvula Neumático 3582i.....	117
3.2.5.1.1.5.3	Sensor de Temperatura PT-1000.....	119
3.2.5.1.1.5.4	La Bomba Criogénica de Trasiego.....	121
3.2.5.1.1.5.5	Los Reguladores de Presión.....	123
3.2.5.1.1.5.6	Válvulas Solenoides ASCO.....	124
3.2.5.1.1.5.7	El Actuador Neumático Rotativo POSITORK.....	127
3.2.5.1.1.5.8	El Analizador: % de Oxígeno Modelo 3010MA.....	127
3.2.5.1.1.6	Identificación Dinámica en el Proceso de Trasiego.....	130
3.2.5.1.1.6.1	Método de Identificación.....	131
3.2.5.1.1.6.2	Metodología Para la Identificación del Sistema de Trasiego Automático.....	131
3.2.5.2	Análisis de Datos.....	132
3.2.5.2.1	La Red de Trasiego.....	132
3.2.5.2.1.1	Descripción General.....	133
3.2.5.2.1.2	Especificaciones Generales.....	134
3.2.5.2.2	Análisis de Pureza del Sistema de Trasiego Automático.....	134
3.2.5.2.3	Identificación no Paramétrica del Sistema de Trasiego.....	141
3.2.5.2.4	Sistema Automático en función a una Secuencia de Operaciones.....	147
3.2.5.2.5	Secuencia de Operación.....	148
3.2.5.2.5.1	Alarmas.....	149
3.2.5.2.6	Simulación de Procesos.....	149
3.2.5.2.6.1	Descripción del Simulador de Procesos HYSYS.....	150
3.2.5.2.6.2	Estudio de las Condiciones que Generan La Vaporización del Oxígeno Líquido en el Sistema de Transporte a Través de La Red de Trasiego.....	151
3.2.5.2.6.3	Selección del Paquete Termodinámico a Utilizar en el Simulador.....	153
3.2.5.2.7	Simulación del Sistema de Trasiego Para Obtener la Curva de Refrigeración en Función a la Apertura de la Válvula Proporcional.....	153
3.2.5.2.8	Integración de Señales al Sistema de Control.....	158
3.2.5.2.8.1	Arquitectura de Control Basado en el Sistema Apacs.....	158
3.2.5.2.8.1.1	Visión General.....	159
3.2.5.2.8.1.2	Fundamentos.....	160
3.2.5.2.8.1.3	Descripción.....	165
3.2.5.2.8.1.4	Aplicación.....	170

3.2.6	Técnicas de análisis de datos.....	174
3.2.6.1	Red de trasiego sistema estructural.....	174
3.2.6.2	Costo de equipos.....	174
3.2.6.3	Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos.....	175

IV RESULTADOS

V DISCUSION DE RESULTADOS

VI CONCLUSIONES

VII RECOMENDACIONES

VIII REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANEXOS

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de las Termocuplas.....	44
Tabla 2: Principales Componentes del Aire.....	57
Tabla 3: Propiedades Físicas del Oxígeno.....	59
Tabla 4: Dependencia de las Propiedades de los Líquidos Respecto a la Temperatura.....	66
Tabla 5: Variaciones del <i>NPSH</i> disponible.....	92
Tabla 6: Pérdidas de Oxígeno Líquido Originadas a un Mes de Operación.....	111
Tabla 7: Muestra los Costos de Oxígeno por Cada 1000 Kg.....	111
Tabla 8: Muestra las Pérdidas a un Año de Operación.....	111
Tabla 9: Características Técnicas de la Válvula de Control.....	116
Tabla 10: Características Técnicas del Posicionador Neumático.....	119
Tabla 11: Propiedades de los Conductores.....	120
Tabla 12: Características Técnicas de la Bomba Criogénica - Motor Eléctrico.....	121
Tabla 13: Técnicas de los Reguladores de Presión de Aire.....	123
Tabla 14: Características Generales de Válvulas Solenoides 2/2.....	124
Tabla 15: Servicio General - 2/2 Normalmente Cerrada 1 1/4" - 2 1/2".....	125
Tabla 16: Servicio General - 2/2 Normalmente Abierta 1/4" - 2 1/2".....	126
Tabla 17: Características del Actuador Neumático.....	127
Tabla 18: Funciones de Operación en Línea.....	128
Tabla 19: Características de Conexión.....	129
Tabla 20: Dimensiones de Tuberías de Cobre Tipo k.....	134
Tabla 21: Datos y Cálculo del Volumen Respecto a "La".....	138
Tabla 22: Valores del factor de eficiencia E, para las distintas condiciones.....	139
Tabla 23: Característica del Proceso de Trasiego.....	142
Tabla 24: Periodo de Arranque.....	143
Tabla 25: Paquetes Termodinámicos Recomendados por el Fabricante del Software para Sistemas Típicos.....	152
Tabla 26: Datos de Entrada para Simular el Comportamiento del Sistema - Red de Trasiego.....	153
Tabla 27: Datos de Salida para Simular el Comportamiento del Sistema - Red de Trasiego.....	153

INDICE DE GRÁFICOS

Figura 1: Logo de la Empresa Messer Gases del Perú S.A.....	1
Figura 2a: Identificación Funcional de un Instrumento.....	5
Figura 2b: Identificación Funcional de un Instrumento.....	6
Figura 3: Líneas y Símbolos Generales.....	6
Figura 4: Símbolos Para Válvulas de Control.....	7
Figura 5a: Símbolos Para Actuadores.....	7
Figura 5b: Símbolos Para Actuadores.....	8
Figura 6: Ejemplo.....	8
Figura 7: Solución.....	9
Figura 8a: Método SAMA.....	9
Figura 8b: Método SAMA.....	10
Figura 9: Sistema de Bucle Abierto.....	11
Figura 10: Sistema de Bucle Cerrado.....	11
Figura 11: Ejemplo de Circuitos Sin PLC.....	14
Figura 12: Ejemplo de Circuitos Con PLC.....	15
Figura 13: Sistema de Control Distribuido.....	17
Figura 14: Áreas de Aplicación.....	20
Figura 15: Arquitectura Protocolar de Profibus.....	21
Figura 16: HMI.....	23
Figura 17: Trasiego.....	25
Figura 18a: Tanque Criogénico.....	26
Figura 18b: Tanque Criogénico.....	27
Figura 19a: Bombas Criogénicas.....	29
Figura 19b: Bombas Criogénicas.....	29
Figura 20: Presión de Vapor de Oxígeno.....	30
Figura 21: Ubicación de la bomba en el proceso de trasiego.....	30
Figura 22: Leyenda.....	31
Figura 23: Producción del Oxígeno Líquido.....	32
Figura 24a: Válvulas Criogénicas.....	34
Figura 24b: Válvulas Criogénicas.....	34
Figura 25: BK y BKA Series de Válvulas.....	35
Figura 26: Información de Dimensiones.....	35
Figura 27: 8500 Series.....	36
Figura 28a: Información de Dimensiones.....	37
Figura 28b: Información de Dimensiones.....	37
Figura 29: Tensión Vs Frecuencia.....	38

Figura 30a: Tensión Vs Frecuencia.....	39
Figura 30b: Tensión Vs Frecuencia.....	39
Figura 31: Instalación del Convertidor de Frecuencia.....	42
Figura 32: Termocuplas.....	43
Figura 33: RTD.....	44
Figura 34: Conexión de un PT-100 Con Dos Hilos.....	45
Figura 35: Conexión de un PT-100 Con Tres Hilos.....	46
Figura 36: Conexión de un PT-100 Con Cuatro Hilos.....	46
Figura 37: Modelo 1151.....	48
Figura 38: Modelo 3051.....	48
Figura 39: Columna de Linde Simple para Separación de Aire.....	50
Figura 40: Columna de Linde Doble para Separación de Aire.....	51
Figura 41: Sistema de Almacenamiento de Fluidos Criogénicos.....	52
Figura 42: Modos de Transferencia de Calor.....	62
Figura 43: Balance de energía entre dos puntos en una tubería de longitud recta.....	68
Figura 44: Nomograma para la determinación de longitudes equivalentes de accesorios.....	75
Figura 45: Partes de una Bomba Centrífuga Tipo Radial de Simple Succión.....	84
Figura 46: Clasificación de Bombas Centrífugas de Acuerdo al Diseño del Impulsor.....	85
Figura 47: Configuraciones Típicas de Columnas Estáticas.....	88
Figura 48: Determinación de la carga neta positiva de succión disponible.....	93
Figura 49: Característica de Rendimiento de una Bomba Centrífuga.....	96
Figura 50: Ejemplos de Curvas Características de Bombas Centrífugas.....	96
Figura 51: Sistema típico de Bombeo.....	100
Figura 52: Carga Positiva Neta Para el Transporte de Fluidos.....	101
Figura 53: Producción de Gases en la Planta ASU.....	107
Figura 54: Tanque de almacenamiento LOX.....	108
Figura 55: Toma de Datos de Nuestra Operación.....	109
Figura 56: Temperatura Vs Tiempo.....	109
Figura 57: Resultados Desde el Sistema de Control.....	110
Figura 58: Resultados del Sistema de Control de Procesos el Cual Registra los Niveles en El.....	110
Figura 59: Vista del Sistema de Traslado de Oxígeno Líquido.....	113
Figura 60: Diagrama de Instrumentación del Proceso - PI&D.....	114
Figura 61: Vista de la Válvula de Control.....	116
Figura 62: Componentes de Montaje del Actuador- Válvula.....	117
Figura 63: Vista del Posicionador.....	118
Figura 64: Resistencia Vs Temperatura.....	120
Figura 65: Vista de la Termocupla - Sensor de Temperatura.....	121
Figura 66: Vista real de la Bomba Criogénica.....	122
Figura 67: Acoplamiento e Instalación.....	122
Figura 68: Curva Característica de la Bomba Criogénica.....	123

Figura 69: Vista de Válvulas Solenoides de 2 Vías, 2 Posiciones.....	125
Figura 70: Actuador Neumático.....	127
Figura 71: Analizador de Pureza de Oxígeno Paramagnético.....	127
Figura 72: Funciones de Operación en Línea.....	128
Figura 73a: Diagrama en Bloque para el Modelo 3010MA – Unidad de Control.....	129
Figura 73b: Diagrama en Bloque para el Modelo 3010MA – Unidad de Control.....	129
Figura 74: Esquema de Flujo del Proceso de Identificación.....	130
Figura 75: Diagrama – Sistema de Trasiego Automático.....	132
Figura 76: Dimensionamiento del Sistema de Trasiego Automático.....	133
Figura 77: Tubería Rígida de Cobre Tipo “K” De 1 ½”Ø.....	133
Figura 78: Comportamiento del Oxígeno en Campos Magnéticos.....	135
Figura 79: Resultado del Análisis al Inicio de la Operación.....	136
Figura 80: Resultado del Análisis Durante el Periodo Predeterminado.....	137
Figura 81: Representación del Flujo de un Gas en una Tubería.....	138
Figura 82: Característica del Sistema de Trasiego.....	142
Figura 83: Respuesta del Sistema en función a $Q\Theta$ (condición de energía) que determina el periodo estable para arranque de Bc.....	144
Figura 84: Diagrama de Bloques planteado para el Sistema de Trasiego Automático.....	144
Figura 85: Resultados Experimentales de la Respuesta al Escalón para el Sistema de Trasiego....	145
Figura 86: Sistema de Trasiego Automático.....	147
Figura 87: Proceso de Trasiego a Ser Simulado.....	153
Figura 88: Configuración de la Bomba para el Uso Criogénico.....	154
Figura 89: Configuración de carga para la succión NPSH.....	154
Figura 90: Configuración Respecto a la Capacidad Calorífica.....	155
Figura 91: Compilación de la Aplicación.....	155
Figura 92: Comportamiento del Sistema en un Periodo Determinado en Función a la Apertura de la Válvula.....	156
Figura 93: Tabla de Compilación del Sistema.....	156
Figura 94: Ciclos de Operación en Secuencia del Sistema de Trasiego Automático.....	157
Figura 95: Comportamiento de la Temperatura del Sistema de Trasiego Automático Respecto a los Ciclos de Operación en Secuencia.....	158
Figura 96: Arquitectura de Control.....	160
Figura 97: Sistema de Control Distribuido.....	161
Figura 98: E/S Discretas, Analógicas, Especiales.....	161
Figura 99: Procesos Continuo.....	161
Figura 100a: Comunicación Medianamente Abierta.....	162
Figura 100b: Comunicación Medianamente Abierta.....	162
Figura 101: NORMA IEC 1131.....	162
Figura 102: Altos Costos.....	163
Figura 103: Altamente Seguros.....	163

Figura 104: Naturaleza Redundante.....	163
Figura 105: Fabricantes.....	164
Figura 106: Pirámide de Automatización.....	164
Figura 107: Componentes del Hardware.....	166
Figura 108: Driver de Comunicación.....	166
Figura 109: Estación de Ingeniería.....	167
Figura 110: Rack.....	167
Figura 111: Tarjetas Controladoras.....	168
Figura 112: Módulos Toma Datos.....	169
Figura 113: Redes Industriales.....	169
Figura 114: Componentes.....	170
Figura 115: Esquema a Implementar.....	172
Figura 116: Esquema de la planta ASU.....	173
Figura 117: Rentabilidad.....	177

1.1 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

En el departamento de Ancash, provincia de Chimbote se encuentra ubicada la empresa Messer Gases del Perú S.A que se dedica a la producción de gases como el nitrógeno (N_2), argón (Ar) y oxígeno (O_2) que se producen a partir de la destilación fraccionada del aire mientras que el dióxido de carbono (CO_2) se encuentra en fuentes naturales (junto con hidrocarburos) o bajo la forma de subproducto de las industrias químicas y petroquímicas. [WEB 01]

El aire es una mezcla de gases formada por aproximadamente un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno, un 0,9% de argón y un 0,1% de gases nobles. Para poder separarlos se recurre al método de destilación fraccionada, a través del cual la mezcla gaseosa se licua mediante la disminución de la temperatura y el aumento de la presión. [WEB 01]

Messer Gases del Perú S.A, es una de las pocas empresas que se dedica a la obtención de Oxígeno líquido en el Perú en el cual el proceso de trasiego¹ se realiza a través de tuberías de 2 pulgadas de diámetro recorriendo 15 metros, en este recorrido se ocasiona un decremento en la eficiencia para la obtención del producto final (Oxígeno líquido) y por ende la distribución a destiempo del producto a sus clientes, siendo este uno de sus problemas principales.



Figura 1: Logo de la Empresa Messer Gases del Perú S.A

¹ Trasiago, es el traslado del producto (oxígeno líquido) de los tanques almacenadores a las cisternas de despacho.

1.2 ANTECEDENTES

Habiendo realizado una pesquisa bibliográfica, respecto a los antecedentes del presente trabajo, se tiene que:

Tema: “Proyecto de instalación de una planta de gas licuado de petróleo en la ciudad de tingo maría”

Autor:

Ing. Hermógenes Díaz Grattelly

El autor llegó a la siguiente conclusión:

- Las operaciones de la planta envasadora de GLP no generan impactos de consideración en la ciudad de Tingo María.
- Las instalaciones estarán perfectamente equipadas para afrontar satisfactoriamente cualquier emergencia, como incendios o accidentes.
- Con un proceso de trasiego de manera autónoma se genera una mayor eficiencia en la producción.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿De qué manera se podrá disminuir la pérdida de producto durante el proceso de trasiego de la empresa Messer Gases del Perú S.A.?

1.4 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.4.1 Objetivo General

Un sistema de diseño de control automático adecuado para el proceso de trasiego de la empresa Messer Gases del Perú S.A.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de control automático el cual debe cumplir con los lineamientos de la planta.
- Diseñar un sistema de control automático seguro, amigable y confiable en donde el operador pueda realizar las distintas operaciones de manera fácil.

- Estimar los costos del proyecto para el desarrollo de un sistema de trasiego automático de oxígeno líquido en el área de despachos de la compañía.

1.5 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

El diseño del sistema de control automático en el proceso de trasiego disminuirá las pérdidas de producto en la empresa Messer Gases del Perú S.A.

1.6 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

1.6.1 En lo Tecnológico:

Un sistema de control automatizado en el proceso de trasiego permite mejorar la eficiencia por ende la productividad de la empresa Messer Gases del Perú S.A.

1.6.2 En lo Académico:

Este trabajo permitirá a los investigadores interesados a profundizar sus conocimientos relacionados a la instrumentación, control de procesos y productividad para la obtención del oxígeno líquido.

1.6.3 En lo social:

La investigación propondrá minimizar el riesgo del operador al realizar el proceso de trasiego.

1.6.4 En lo Económico:

La propuesta para la empresa Messer Gases del Perú S.A permitirá mejorar su productividad al administrar mejor todos sus recursos.

2.1 INTRODUCCIÓN A LA INSTRUMENTACIÓN

Simbología, normas y sistemas de unidades. [WEB 02]

2.1.1 Simbología

La simbología es un proceso abstracto en el cual las características salientes de los dispositivos o funciones son representadas de forma simple por figuras geométricas.

2.1.1.1 Objetivos:

- Indicar lo realizado.
- Simplificar un proceso.
- Ayudar con el mantenimiento.

2.1.2 P&ID:

- Documento fundamental de un proyecto de automatización o instrumentación.
- Incluye todos los elementos a instalar en el proceso (incluyendo servicios auxiliares, purgas, sistemas de lavado y drenaje, etc.)
- Presenta condiciones de diseño de los equipos a instalar. Identifica las cañerías, refiriendo los materiales, diámetros, aislaciones, etc.
- Detalla los sistemas de control a utilizar y presenta desde sus sensores hasta los actuadores.
- Complementa al PFD (Process Flow Diagram)
- Sirve de base para la ingeniería de detalle Se suele ir actualizando durante el proyecto.

2.1.3 Norma ISA

- La Instrument Society of America de los Estados Unidos crea y actualiza permanentemente, las normas usadas en la instrumentación empleada en todo proceso.
- La creación de un manual tiene como objetivo el uniformar los conocimientos en el campo de la instrumentación y no pretende ser un elemento estático, sino en permanente revisión, pues una de las características de una norma es su actualización repetitiva
- ANSI / ISA S 5.1 - 1984 (R1992).

2.2 IDENTIFICACIÓN DE UN INSTRUMENTO

2.2.1 Instrumento:

Objeto fabricado, simple o formado por una combinación de piezas, que sirve para realizar un trabajo o actividad, especialmente el que se usa con las manos para realizar operaciones manuales técnicas o delicadas, o el que sirve para medir, controlar o registrar algo.

2.2.2 Identificación funcional de un instrumento:

- Todas las letras son mayúsculas.
- No más de 4 letras son utilizadas.
- Identificación del instrumento + identificación funcional.
- La identificación de los símbolos y elementos debe ser alfa numérica, los números representan la ubicación y establecen el lazo de identidad, y la codificación alfabética identifica al instrumento y a las acciones a realizar.

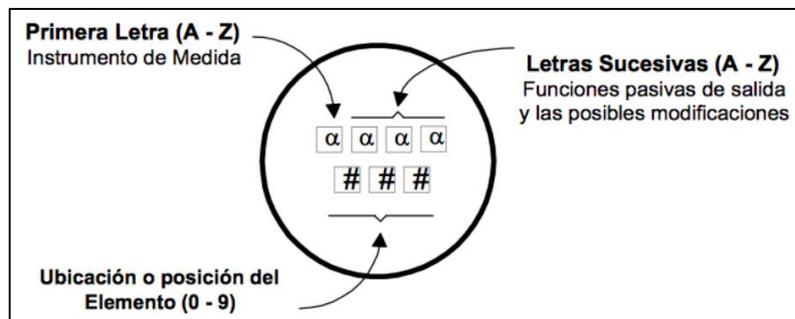


Figura 2a: Identificación Funcional de un Instrumento

Primera Letra	Variables Medidas	Controladores				Dispositivos de salida		Interruptores y Dispositivos de Transmisión de Alarmas						Solenoides, Réles	Elementos primarios	Punto de muestreo
						Registros	Indicadores	Registros			Indicadores					
A	Análisis	ARC	AIC	AC		AR	AI	ASH	ASL	ASHL	ART	AIT	AT	AY	AE	AP
B	Combustión	BRC	BIC	BC		BR	BI	BSH	BSL	BSHL	BRT	BIT	BT	BY	BE	
C	Conductividad															
D	Densidad															
E	Voltaje	ERC	EIC	EC		ER	EI	ESH	ESL	ESHL	ERT	EIT	ET	EY	EE	
F	Flujo	FRC	FIC	FC	FCV	FR	FI	FSH	FSL	FSHL	FRT	FIT	FT	FY	FE	FP
FQ	Cantidad de flujo	FQRC	FFIC			FQR	FQI	FQSH	FQSL			FQIT	FQT	FQY	FQE	
FF	Flujo Promedio	FFRC	FFIC	FFC		FFR	FFI	FFSH	FFSL							
G																
H	Corriente Eléctrica		HIC	HC						HS						
I	Tiempo	IRC	IIC			IR	II	ISH	ISL	ISHL	IRT	IIT	IT	IY	IE	
J	Nivel	JRC	JIC			JR	JI	JSH	JSL	JSHL	JRT	JIT	JT	JY	JE	
K		KRC	KIC	KC	KCV	KR	KI	KSH	KSL	KSHL	KRT	KIT	KT	KY	KE	
K		LRC	LIC	LC	LCV	LR	LI	LSH	LSL	LSHL	LRT	LIT	LT	LY	LE	
M	Humedad															
N																
O																
P	Presión	PRC	PIC	PC	PCV	PR	PI	PSH	PSL	PSHL	PRT	PIT	PT	PY	PE	PP
PD	Presión Diferencial	PDR	PDI	PDSH	PDSL	PDR	PDI	PDR	PDI	PDR	PDI	PDR	PDI	PDR	PDI	PDR
Q	Cantidad	QRC	QIC			QR	QI	QSH	QSL	QSHL	QRT	QIT	QT	QY	QE	QP
R	Radiación	RRC	RIC	RC		RR	RI	RSH	RSL	RSHL	RRT	RIT	RT	RY	RE	
S	Velocidad	SRC	SIC	SC	SCV	SR	SI	SSH	SSL	SSH	SRT	SIT	ST	SY	SE	TP
T	Frecuencia	TDR	TDIC	TDC	TDCV	TR	TI	TSH	TSL	TSHL	TRT	TIT	TT	TY	TE	TDP
TD	Temperatura diferencial					TDR	TDI	TDR	TDI	TDR	TDI	TDR	TDI	TDR	TDI	TDR
U	Multivariable															
V	Vibración ó Análisis Mecánico					VR	VI	VSH	VSL	VSHL	VRT	VIT	VT	VY	VE	
W	Peso	WRC	WIC	WC	WCV	WR	WI	WSH	WSL	WSHL	WRT	WIT	WT	WY	WE	
WD	Peso Diferencial	WDR	WDI	WDR	WDI	WDR	WDI	WDR	WDI	WDR	WDI	WDR	WDI	WDR	WDI	WDR
Y	Evento, Estado Presencia		YIC	YC		YR	YI	YSH	YSL	YSHL	YRT	YIT	YT	YY	YE	
Z	Posición Dimensionamiento	ZRC	ZIC	ZC	ZCV	ZR	ZI	ZSH	ZSL	ZSHL	ZRT	ZIT	ZT	ZY	ZE	
ZD	Posición	ZDR	ZDI	ZDR	ZDI	ZDR	ZDI	ZDR	ZDI	ZDR	ZDI	ZDR	ZDI	ZDR	ZDI	ZDR

Figura 2b: Identificación Funcional de un Instrumento

2.2.3 Líneas y Símbolos Generales

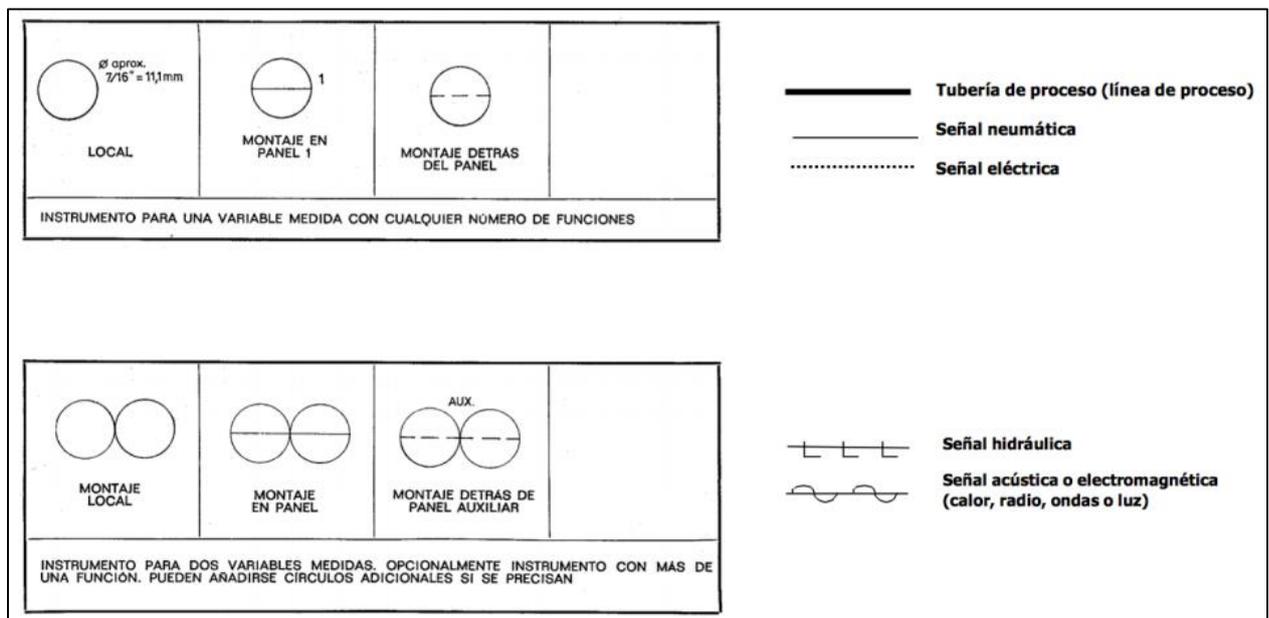


Figura 3: Líneas y Símbolos Generales

2.2.4 Símbolos Para Válvulas de Control

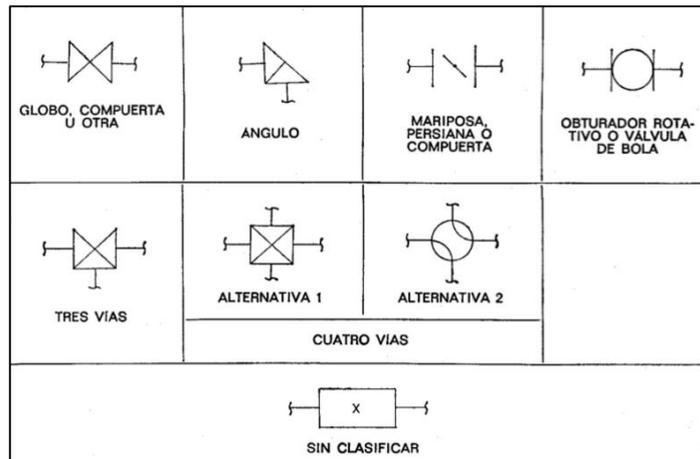


Figura 4: Símbolos Para Válvulas de Control

2.2.5 Símbolos Para Actuadores

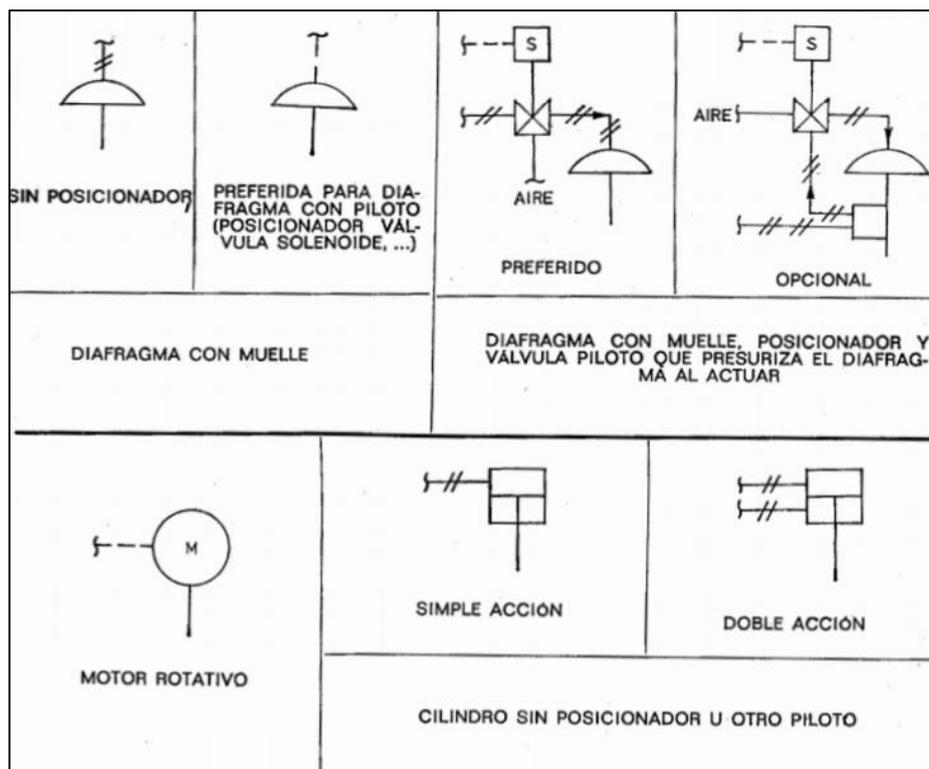


Figura 5a: Símbolos Para Actuadores

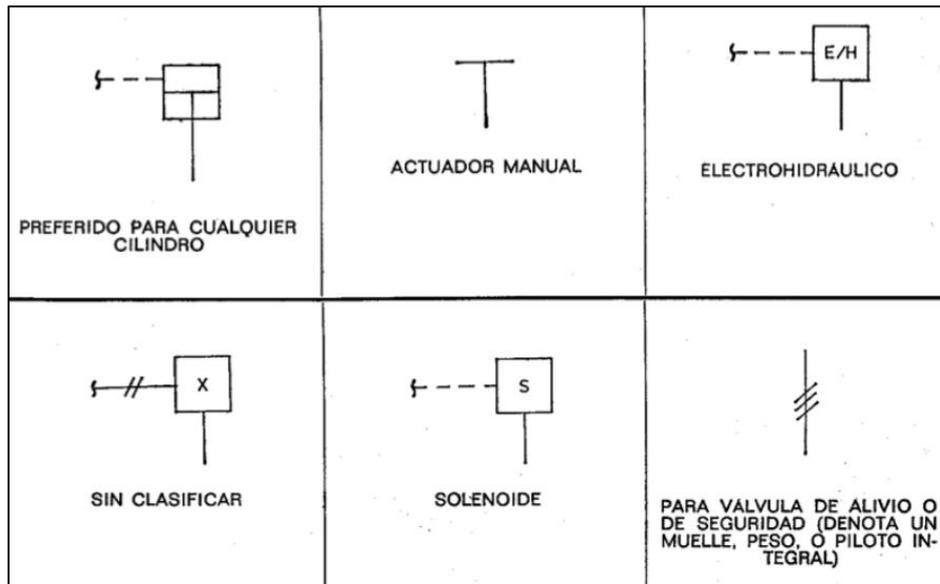


Figura 5b: Símbolos para Actuadores

2.2.6 Ejemplo:

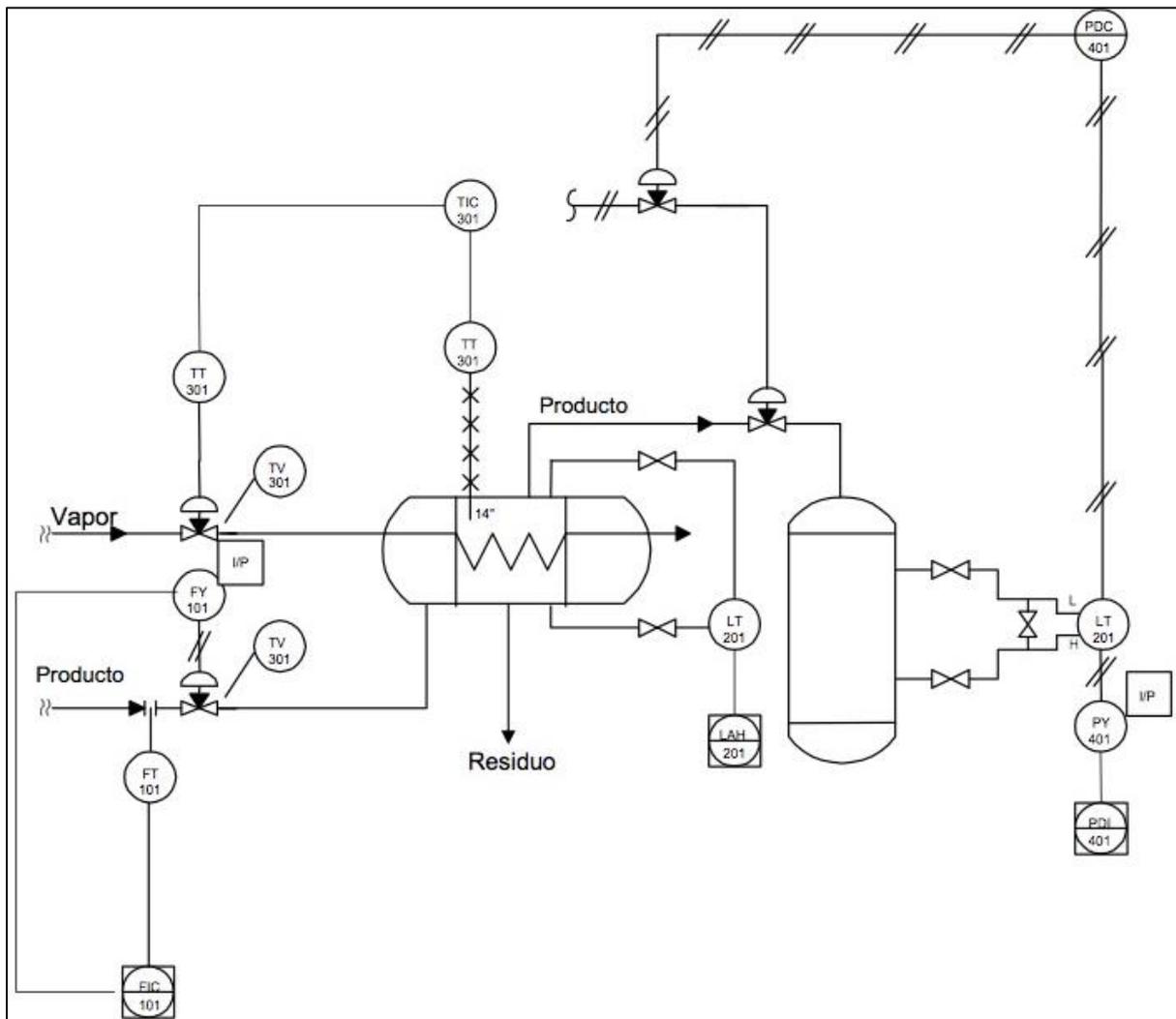


Figura 6: Ejemplo

2.2.7 Solución:

Leyenda:	
FT	: Transmisor de Flujo
FIC	: Controlador Indicador de flujo
FY	: Relé de Flujo
LAH	: Nivel con Alarma de Alta
LT	: Transmisor de Nivel
I/P	: Corriente/Neumático
PY	: Relé de presión
PDI	: Indicador Presión Diferencial
PDC	: Controlador Presión Diferencial
TT	: Transmisor de Temperatura
TV	: Válvula de Temperatura
TIC	: Controlador Indicador de Temperatura

Figura 7: Solución

2.2.8 SAMA

El método SAMA (Scientific, Apparatus Makers Association) de diagramas funcionales que se emplean para las funciones block y las designaciones de funciones.

Signal Processing Symbols			
Addition	Σ	High Selecting	>
Averaging	Σ/n	Low Selecting	<
Difference	Δ or -	High Limiting	∇
Proportional	K or P	Low Limiting	∇
Integral	\int or I	Reverse Proportional	-K or -P
Derivative	d/dt or D	Velocity Limit	$V \nabla$
Multiplying	X	Bias	\pm
Dividing	\div	Time function	f(t)
Root Extract	$\sqrt[n]{x}$	Signal transfer	T
Non-Linear	$f_1(x)$	Signal generation	A
Tri-state	\updownarrow	Signal comparator	H/, /L

Figura 8a: Método SAMA

Enclosure Symbols	
	Measuring or Readout
	Manual Signal Processing
	Automatic Signal Processing
	Final Controlling

Figura 8b: Método SAMA

2.3 SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN

Según Antonio Creus Solé (2005) “Desde los inicios de la era industrial a la actualidad, la automatización de procesos ha pasado a ser una herramienta indispensable, actualmente ninguna empresa puede dejar de lado la automatización de sus procesos pues esta aumenta la calidad de sus productos finales, reduce los tiempos de producción, realiza tareas complejas, reduce los desechos y por lo tanto aumenta la rentabilidad productiva. La mayor calidad en los productos se logra mediante la exactitud de las maquinas automatizadas y por la eliminación de los errores propios del ser humano, lo que a su vez repercuten grandes ahorros de tiempo y materia.

Consideramos como proceso, al conjunto de los diferentes momentos sucesivos o también a las diferentes acciones sucesivas realizadas para conseguir un determinado resultado. Un sistema es una combinación de componentes que actúan conjuntamente para cumplir un determinado objetivo. Denominados perturbaciones de un proceso como aquellos hechos o situaciones que se producen en el sistema y que tienden a afectar adversamente el desarrollo del proceso. Si la perturbación se genera dentro del sistema, se denomina perturbación interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del mismo. La palabra control se toma en el sentido de regular, dirigir o mandar y la podemos considerar como el conjunto de acciones complementarias encaminadas al mando y dominio de otras actividades y por ello, un sistema de control es una interconexión de componentes que forman una configuración de tal manera que mandan, dirigen o regulan a un sistema según una respuesta deseada del mismo. Se denomina consigna (punto de referencia) a las condiciones de referencia en las que esperamos se desarrolle el proceso o dicho de otra forma, representa el comportamiento deseado para el mismo. Con la consigna se establece los posibles márgenes de variación de determinadas magnitudes que serán comparadas con otras de la misma naturaleza medidas en el proceso y que lo caracterizan. Los sistemas de control, según el desarrollo del proceso tengan efecto o no sobre la acción de control, se pueden clasificar en: sistemas de bucle (o lazo) abierto o sistemas de bucle cerrado”.

2.3.1 Sistemas en Bucle Abierto

Según Antonio Creus Solé (2005) “Se caracterizan por que la información o variables que controlan el proceso circulan en una sola dirección, desde la unidad de control al proceso. El sistema de control no recibe ninguna información sobre el desarrollo (variables de salida) del mismo y, por tanto este no tiene ningún efecto sobre la acción de control”. La siguiente figura muestra el diagrama de bloques de un sistema de control de este tipo:

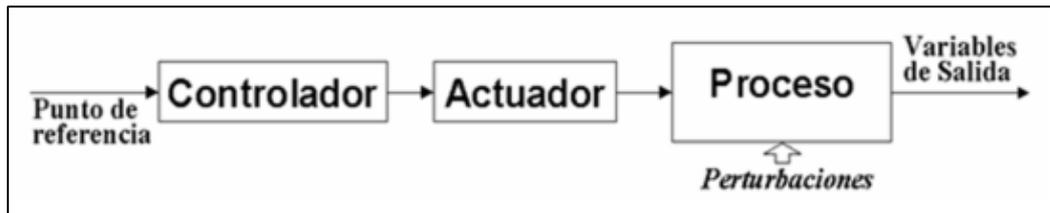


Figura 9: Sistema de Bucle Abierto

En estos sistemas, la consigna determina una condición de operación fija no adaptable a los posibles cambios. La precisión depende de la calibración y, cuando se producen perturbaciones (internas o externas), el proceso no se desarrolla de la forma esperada.

2.3.2 Sistemas de Bucle Cerrado

Según Antonio Creus Solé (2005) “Se tiende a mantener una relación prestablecida entre el desarrollo del proceso (variables de salida) y las entradas de referencia (consigna), comparándolas y utilizando su diferencia como señal de control”. La siguiente figura muestra el diagrama de bloques de uno de estos sistemas.

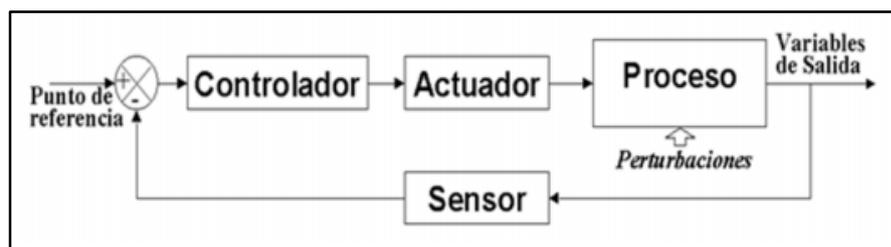


Figura 10: Sistema de Bucle Cerrado

Cualquier proceso que queramos controlar, estará sometido a perturbaciones (internas y externas) que tenderán a desviarlo de su desarrollo deseado. Para conocer el desarrollo del proceso y poder compensar así sus desviaciones, se seleccionan aquellas magnitudes que lo caractericen, y que son medidas a través de los sensores, de tal forma que nos permitan conocer si el proceso está evolucionando dentro de los márgenes prestablecidos o no. Las señales que producen los sensores se comparan con las señales de referencia o consigna (que establecen la situación deseada) de tal forma que la señal diferencia de

ambas (señal error) determina las acciones a realizar, tienden a acercar la respuesta del sistema a la deseada. El termino lazo o bucle cerrado, ya que posibilita tanto el control continuo de determinadas magnitudes y por tanto la posibilidad de reacción sobre su desarrollo.

2.3.3 Controladores

2.3.3.1 Control Todo o Nada

Según Carlos A. Smith, Armando B. Corripio (1991) “Es la regulación más simple y económica, utilizada en numerosas aplicaciones en las que puede admitirse una oscilación continua entre dos límites, siempre y cuando se trate de procesos de evolución lenta, como ejemplos podemos citar la regulación de nivel o de temperatura, todos estos son problemas de relativamente sencillos de lógica digital, quiere decir de los estados cero o uno, o también on/off. Numerosos reguladores incorporan esta función básica, que además ofrece la máxima rapidez de respuesta y en ocasiones se recurre a este tipo de control cuando el error es grande, y se pasa de forma automática a otro tipo de regulación cuando el error se aproxima a cero”.

2.3.4 Control PID

Según Carlos A. Smith, Armando B. Corripio (1991) “El algoritmo de control más ampliamente extendido es el PID, pero existen muchos otros métodos que pueden dar un control de mayor calidad en ciertas situaciones donde el PID no responde a la perfección. El PID da buenos resultados en la inmensa mayoría de casos y tal vez es por esta razón que goza de tanta popularidad frente a otros reguladores teóricamente mejores.

Los diseñadores de software de regulación pretenden que programar los nuevos sistemas de control sea tan fácil y familiar como el PID, lo que posibilitaría una transición sin dificultades.

Sea cual sea la tecnología de control, el error de regulación es la base a partir de la cual actúa el PID y se intuye que cuando más precisa sea la medida, mejor se podrá controlar la variable en cuestión. Esta es la razón por la que el sensor es el elemento crítico del sistema. También se debe pensar en la instalación, especialmente en la forma en que se transmiten los datos del sensor hacia el regulador y posibles fuentes de interferencias.

Un regulador proporcional-integral-derivativo o PID tiene en cuenta el error, la integral de error y la derivada de error. La acción de control se calcula multiplicando los tres valores por una constante y sumando los resultados. Los valores de las constantes reciben el nombre de constante proporcional, integral, derivativa y definen el comportamiento del regulador”.

2.4 CONTROLADOR LOGICO PROGRAMABLE (PLC)

Según Carlos A. Smith, Armando B. Corripio (1991) “Hasta no hace mucho tiempo el control de procesos industriales se venía haciendo de forma cableada por medio de contactores y relés. Al operario que se encontraba a cargo de este tipo de instalaciones, se le exigía tener altos conocimientos técnicos para poder realizarlas y posteriormente mantenerlas, además cualquier variación en el proceso suponía modificar físicamente gran parte de las conexiones de los montajes, siendo necesario para ello un gran esfuerzo técnico y un mayor desembolso económico.

El PLC trabaja atendiendo sus entradas y dependiendo de su estado conecta/desconecta sus salidas. El usuario introduce un programa, normalmente vía software que proporciona los resultados deseados. Los PLC son utilizados en muchas aplicaciones reales, casi cualquier aplicación que necesite algún tipo de control eléctrico necesita un PLC. Entonces se define un PLC como una computadora especializada, diseñada para controlar máquinas y procesos en ambientes industriales operando en tiempo real”.

2.4.1 Ventajas y Desventajas del PLC

a) Ventajas

Menor tiempo empleado en la elaboración de proyectos debido a que:

- La lista de materiales queda sensiblemente reducida, y al elaborar el presupuesto correspondiente eliminaremos parte del problema que supone el contar con diferentes proveedores, distintos plazos de entrega, etc.
- Posibilidad de realizar modificaciones sin cambiar el cableado.
- Mínimo espacio de ocupación.
- Menor costo de mano de obra de la instalación.
- Economía de mantenimiento, aumento de la fiabilidad del sistema al eliminar contactos móviles, los mismos autómatas pueden detectar e indicar averías.
- Posibilidad de gobernar varias máquinas con un mismo autómata.
- Menor tiempo para la puesta de funcionamiento del proceso al quedar reducido el tiempo de cableado.

- Si por alguna razón la maquina queda fuera de servicio, el autómatas queda útil para otra máquina o sistema de producción.

b) Desventajas

En primer lugar, de que hace falta un programador lo que obliga a adiestrar a los técnicos, pero hoy en día ese inconveniente está solucionado porque las universidades y/o institutos superiores ya se encargan de dicho adiestramiento. Pero hay otro factor importante como el costo inicial que puede o no ser un inconveniente, según las características del automatismo en cuestión, dado que el PLC cubre ventajosamente en amplio espacio entre la lógica cableada y el microprocesador es preciso que el proyectista lo conozca tanto en cualidades como sus limitaciones, por tanto, aunque el coste inicial debe tenerse en cuenta a la hora de decidimos por uno u otro sistema, conviene analizar todos los demás factores para asegurarnos una decisión acertada.

c) Ejemplo de Circuitos sin PLC

Según Antonio Creus Solé (2005) “La siguiente figura muestra un típico circuito de automatismos, un arrancador estrella/triángulo con temporizador, donde por una parte tenemos el circuito de fuerza, que alimenta el motor, y por otra el circuito auxiliar o de mando, que realiza la maniobra de arranque de dicho motor”.

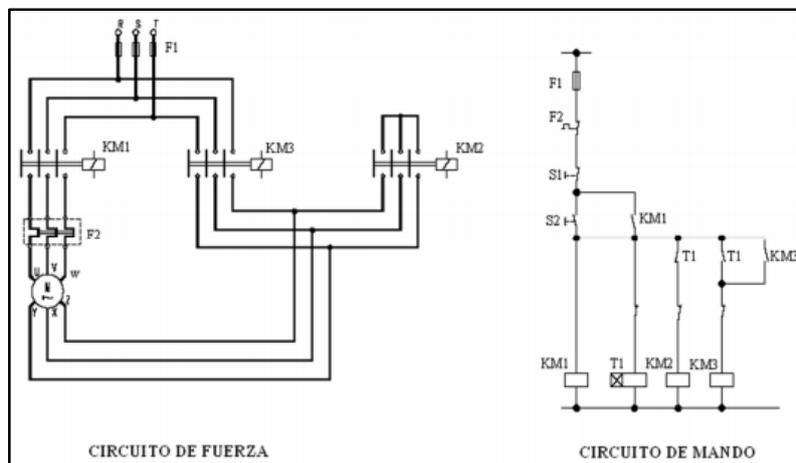


Figura 11: Ejemplo de Circuitos sin PLC

d) Ejemplo de Circuitos con PLC

Según Antonio Creus Solé (2005) “La siguiente figura muestra cómo se realiza el mismo propósito de manera programada, el circuito de fuerza es exactamente el mismo que en la técnica cableada, sin embargo, el de mando será sustituido por un autómatas programable, al cual se unen eléctricamente los pulsadores y las bobinas de

los contactores. La maniobra de arranque la realizara el programa que previamente se ha transferido al autómata”.

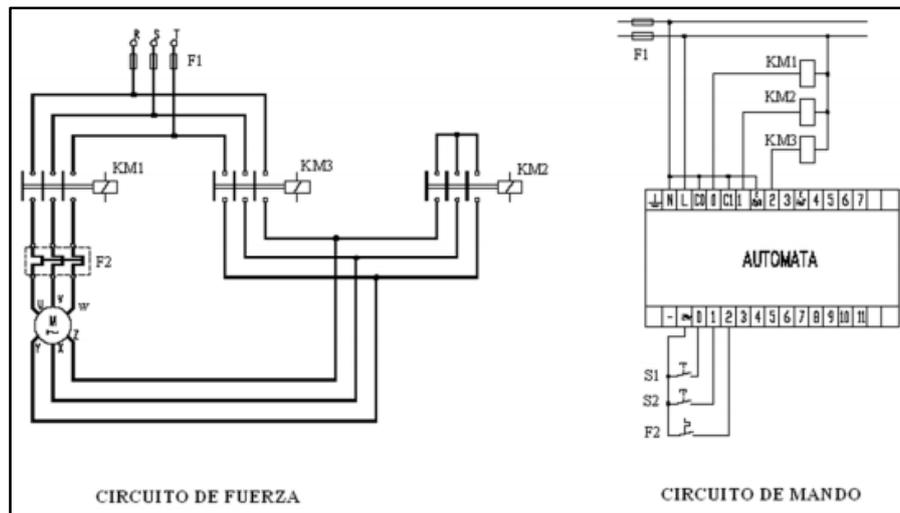


Figura 12: Ejemplo de Circuitos con PLC

2.4.2 Partes de un PLC

La estructura básica de cualquier autómata programable es la siguiente:

- Fuente de alimentación
- CPU
- Módulos I/O
- Terminales de Programación
- Periféricos de Comunicación

2.5 ARQUITECTURA DE CONTROL

Según Carlos A. Smith, Armando B. Corripio (1991) “La arquitectura de control es el conjunto de elementos involucrados que regulan el comportamiento de un sistema a controlar, (controladores, sensores, actuadores, sistema de supervisión, buses de comunicación, etc.) ésta tendrá éxito en función a la capacidad de adaptarse a las necesidades específicas de cada proceso, por lo tanto, un sistema de control debe: garantizar la estabilidad, ser robusto frente a perturbaciones, tener alta escalabilidad, ser fácilmente implementable, ser cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador y ser tan eficiente como sea posible de acuerdo al criterio preestablecido, puesto que en todas industrias se desea que los productos finales de los procesos sean de calidad, a precio competitivo, suministro a la brevedad de tiempo, todas éstas características influyen mucho en la eficiencia del sistema de control.

Las necesidades productivas de cada industria marcarán las características de su sistema de control. Por otra parte, las tecnologías están cambiando a una enorme velocidad, lo que hace que el predominio de una tecnología de control, durante un determinado período de tiempo, sea más intenso, de tal manera que hay que ser muy objetivo a la hora de implementar una nueva tecnología, normalmente se realizaba un control centralizado que podían gestionar cientos de lazos, al seguir avanzando los procesos y las tecnologías apareció la necesidad del control distribuido dividiéndolas en partes, las cuales eran supervisadas por un sistema superior, que a su vez pasaba la información a los sistemas informáticos de gestión según la pirámide o niveles de comunicaciones”.

2.6 SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO

Según Carlos A. Smith, Armando B. Corripio (1991) “Control distribuido se denomina a la asignación de tareas a varios controladores instalados en zonas estratégicas en la planta como muestra en la Fig. 11, en vez de instalar un controlador central de gran capacidad, los pequeños controladores interconectados vía un sistema de bus de campo”. Presentando las siguientes Ventajas:

- Programación más sencilla con programas más pequeños.
- Un arreglo más confiable de la estructura del sistema.
- Facilidad para ampliar o modificar el sistema.
- Mayor disponibilidad de información en el sistema debido a la presencia de controladores autónomos.
- Tiempo de reacción muy cortos, independiente de los tiempos de operación de bus.

Aunque muchas veces, de forma errónea, son agrupadas dentro del término "Bus de Campo", las redes de control distribuido son sistemas de comunicaciones completos, dirigidos fundamentalmente a la transmisión de información, que permite la interconexión de múltiples dispositivos de proceso con la inteligencia suficiente como para soportar el protocolo de comunicaciones de la red y para elaborar la información que ésta requiera. Ejemplos de este tipo de redes serían Ethernet/TCP/IP o Industrial-Ethernet, la diferencia fundamental respecto a los "Buses de Campo" es que para éste caso no se está realizando un cálculo multiplexado de bits digitales, si no, que se establece una comunicación interactiva entre los diferentes elementos o dispositivos que componen la red, por ejemplo, el centro de control no sólo podrá parametrizar un dispositivo concreto de la red, si no, que podrá modificar íntegramente el programa que dicho dispositivo ejecuta, transferir ficheros, requerir históricos de datos almacenados, etc.

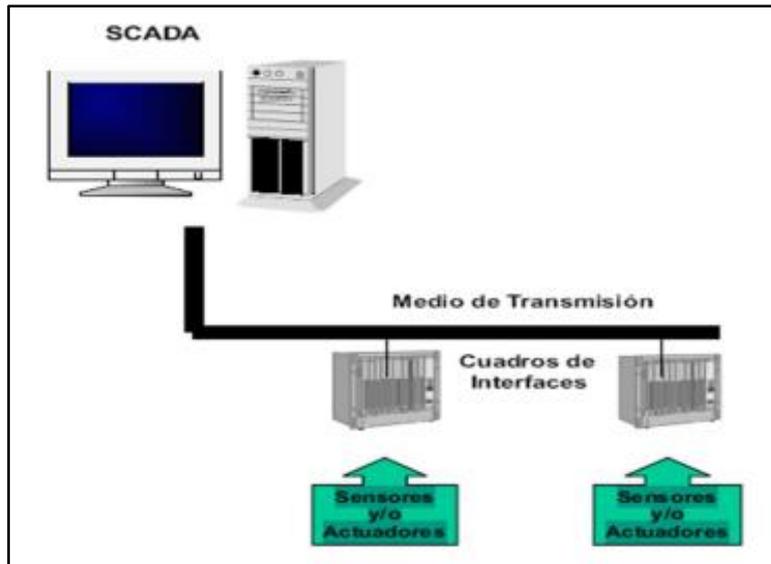


Figura 13: Sistema de Control Distribuido

En general las redes de control distribuido son las más utilizadas en los sistemas de supervisión y/o adquisición donde los dispositivos distribuidos disponen de un grado de inteligencia tal que pueden conformar células autónomas de control con su propia capacidad de procesado y almacenamiento de la información y que, por lo tanto, son totalmente independientes de la existencia o no del ordenador de central de proceso.

2.7 BUSES DE CAMPO

Según Antonio Creus Solé (2005) “Bus de campo llamado también “Fieldbus” es relacionado con una red de características propias, que nos permite conectar dispositivos de campo ubicados en plantas industriales, con el fin que interactúen entre ellos, en cierta medida es cierto, pero no es la definición más adecuada. Fieldbus se refiere a tecnologías de comunicación y protocolos usados en automatización y control de procesos industriales. La tarea del bus de campo es comunicar los sensores y actuadores con sistemas inteligentes como los PLC y las computadoras, de manera que la información que ellos puedan brindar, pueda recorrer el sistema de información de toda la planta”. El bus de campo debe cumplir estrictamente con los requerimientos de modularidad, seguridad, flexibilidad, resistencia a interferencias, facilidad de instalación, mantenimiento, programación, además debe cumplir principalmente dos aplicaciones diferentes:

- El control secuencial de las maquinarias o fábricas, donde la protección contra el peligro de explosión no es un factor crítico. Se caracteriza por tiempos de reacción cortos, elevada velocidad de transmisión y longitud de buses de hasta 300 metros.
- El control de procesos, donde la protección contra los peligros de explosión debe ser intrínsecamente segura, es posible tener ciclos de tiempo de 100ms para control y se puede cubrir mayores distancias a 1500 mts.

2.7.1 Buses de Campo Propietario

Son aquellos sistemas que se caracterizan por su restricción de componentes a los productos de un solo fabricante, por lo tanto, no existe compatibilidad con productos de otros fabricantes.

Una de las ventajas principales de estos buses de campo cerrados o propietarios es que tienen bajo requerimiento de configuración y puesta a punto, ya que todos los componentes se obtienen de un solo fabricante.

2.7.2 Buses de Campo Abierto

Los buses de campo abierto son todo lo contrario, son sistemas que facilitan la comunicación entre dispositivos de diferentes sin necesidad de adaptaciones de adicionales, en pocas palabras, los usuarios podrán usar o desarrollar productos basados en estos buses de campo abiertos a un costo razonable y sin mucho esfuerzo, existe una completa disponibilidad de herramientas y componentes de hardware y software.

Un bus de campo debe permitir por lo menos tres cosas:

- Interconectividad: Los diversos fabricantes pueden ser conectados en forma segura al bus.
- Interoperabilidad: Es la habilidad para la conexión de diversos elementos de diversos fabricantes.
- Intercambio: Los equipos de un fabricante pueden ser reemplazados con una funcionalidad equivalente por equipos de otros fabricantes.

Si la interoperabilidad no puede ser lograda, la misma operación del bus de campo es limitada y tal bus de campo se convierte en una opción poco útil. La última meta es la capacidad de intercambio, esto solo puede ser posible si las especificaciones son completas y se cuenta con un apropiado sistema de prueba y validación de los equipos. Si se selecciona correctamente un bus de campo para una determinada aplicación se puede ofrecer al usuario muchas ventajas tangibles e intangibles tales como:

- Reduce la complejidad del sistema de control en términos de hardware.
- Permite reducir la cantidad de equipos de control tales como: PLC, DCS, hardware, etc. adicionalmente reduce la necesidad de instalar grandes cabinas de control para tales equipos, como el cableado es drásticamente

reducido en el campo, la cantidad de accesorios de montaje también se reduce drásticamente. Todo esto implica un ahorro directo y muy significativo de costos.

- Al reducir los requerimientos de hardware, también se reducen los tiempos de instalación y requerimientos de mano de obra. La implementación física de las instalaciones es mucho más rápida, además, las funciones de diagnóstico de Fieldbus identifican cualquier error en las conexiones.
- Debido a que se reduce la complejidad del sistema de control, la etapa de diseño que es la parte de ingeniería se desarrolla en menor tiempo y por tanto el costo es menor. La necesidad de diseñar complicados esquemas de control y de cableado se simplifica significativamente.
- Las modificaciones futuras, con actualización o ampliaciones que son fácilmente implementadas y a un costo menor.
- Al seleccionar un sistema reconocido, abierto y bien establecido, el equipo de campo de su planta puede ser intercambiable con equipos de otros fabricantes sin preocupaciones por problemas de incompatibilidad.
- Los tiempos de parada y pérdidas de producción son reducidos porque los procedimientos de diagnóstico y corrección de fallas del sistema Fieldbus permiten tomar acciones rápidamente.
- En la actualidad existen muchas opciones. Algunos fabricantes han desarrollado sistemas basados en tecnologías disponibles (como la interfaz RS-232 o el protocolo MODBUS) con las limitaciones existentes. Otras compañías, sin embargo, han desarrollado nuevos y más poderosos estándares que ofrecen el manejo de mayores cantidades de información a mayor velocidad que MODBUS. Un ejemplo de ellos es PROFIBUS. Podemos listar aquellas que son de gran popularidad. Algunas de ellas son buses de campo completamente definidos, otras son solamente tecnologías básicas. Algunos son sistemas propietarios y otros de arquitectura abierta. Los siguientes buses de campo son considerados obsoletos, con un buen pasado pero sin mucho futuro:

- ModBus
- Hart
- Data highway
- Data highway plus

Algunos sistemas con mejor rendimiento:

- ProfiBus DP - Allen-Bradley Remote I/O
- ModBus Plus - DeviceNet
- FIPIO - AS-I
- SINEC - FIP

- Omron Sysmac - Smart Distributed System
- ProfiBus FMS

2.8 PROFIBUS

PROFIBUS es un bus de campo standard que acoge un amplio rango de aplicaciones en fabricación, procesado y automatización. La independencia y franqueza de los vendedores está garantizada por la norma EN 50 170. Con PROFIBUS los componentes de distintos fabricantes pueden comunicarse sin necesidad de ajustes especiales de interfaces. PROFIBUS puede ser usado para transmisión crítica en el tiempo de datos a alta velocidad y para tareas de comunicación extensas y complejas. Esta versatilidad viene dada por las tres versiones compatibles que componen la familia PROFIBUS: [Web 03]

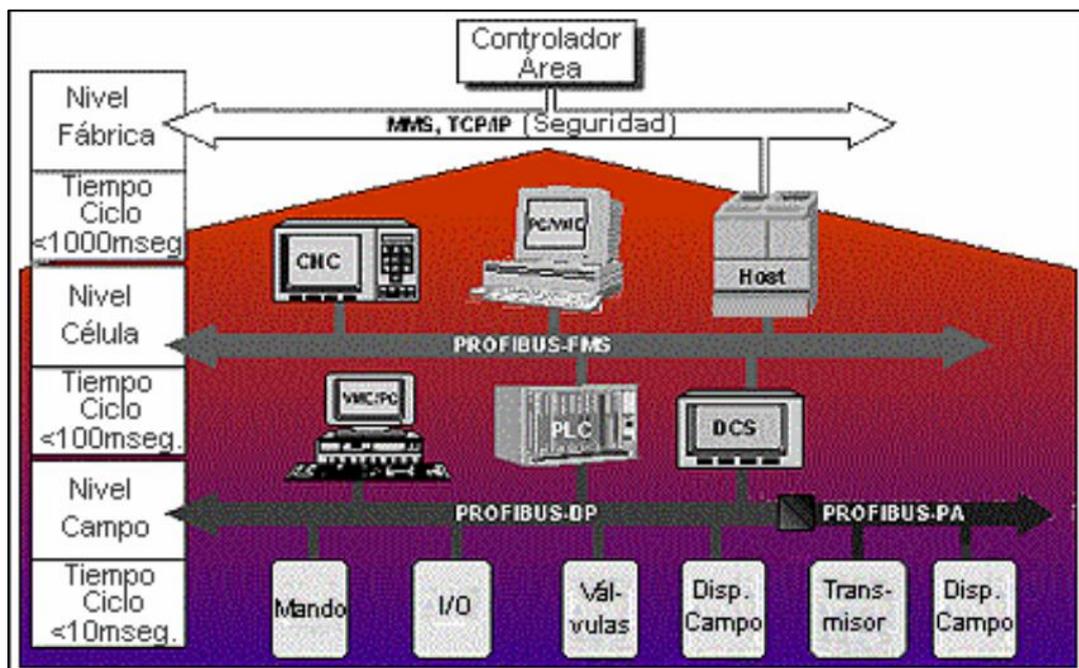


Figura 14: Áreas de Aplicación

2.8.1 Profibus PA:

- Diseñado para automatización de procesos.
- Permite la conexión de sensores y actuadores a una línea de bus común incluso en áreas especialmente protegidas.
- Permite la comunicación de datos y energía en el bus mediante el uso de 2 tecnologías (norma IEC 1158-2).

2.8.2 Profibus DP:

- Optimizado para alta velocidad.
- Conexiones sencillas y baratas.
- Diseñada especialmente para la comunicación entre los sistemas de control de automatismos y las entradas/salidas distribuidas.

2.8.3 Profibus FMS:

- Solución general para tareas de comunicación a nivel de célula.
- Gran rango de aplicaciones y flexibilidad.
- Posibilidad de uso en tareas de comunicaciones complejas y extensas.

2.8.4 Arquitectura Protocolar

PROFIBUS está basado en normas internacionalmente reconocidas. La arquitectura protocolar está orientada al sistema OSI (Open System Interconnection), modelo de referencia de acuerdo con la norma internacional SO 7498. En este modelo cada capa de la transmisión realiza tareas definidas de forma precisa. [Web 03]

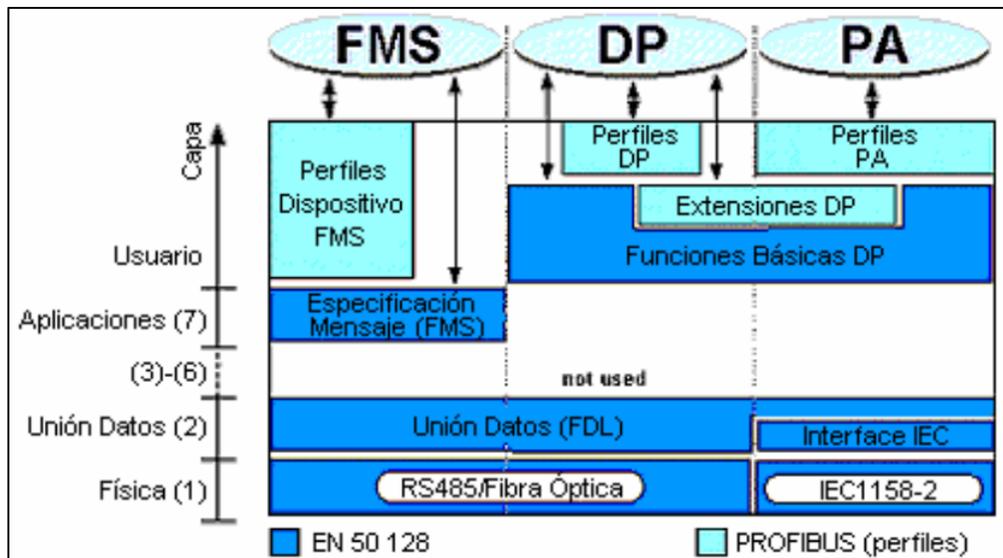


Figura 15: Arquitectura Protocolar de Profibus

- La Capa 1 o Capa física define las características de la transmisión.
- La Capa 2 o Capa de Enlace (FDL – Fieldbus Data Link) define el protocolo de acceso al bus y se encarga de establecer el orden de circulación del testigo una vez inicializado el bus, adjudicando el testigo en el arranque, en caso de pérdida del mismo, o en caso de adición o eliminación de estaciones activas.

- La Capa 7 o Capa de aplicación define las funciones de aplicación.

2.8.4.1 PROFIBUS DP:

- Usa las capas 1 y 2 y el interface de usuario, mientras que no define de las capas 3 a 7.
- Asegura una transmisión de datos rápida y eficiente.
- El DDLM (Direct Data Link Mapper) proporciona al interface de usuario un fácil acceso a la capa 2.
- Las funciones de aplicación disponibles por el usuario así como el comportamiento del sistema se especifican en el interface de usuario.
- Se permite una comunicación RS-485 o por fibra óptica.

2.8.4.2 PROFIBUS FMS:

- Define las capas 1, 2 y 7.
- La capa de aplicación está formada por las subcapas FMS (Fieldbus Message Specification) y LLI (Lower Layer Interface).
- FMS contiene el protocolo de aplicación y proporciona al usuario una amplia selección de potentes servicios de comunicación.
- LLI implementa varias relaciones de comunicación y proporciona a FMS un acceso independiente a la capa 2.
- La capa 2 (capa de unión de datos) ofrece el control de acceso al bus y garantiza la seguridad de los datos.

2.8.4.3 PROFIBUS PA:

- Utiliza el protocolo DP extendido para la transmisión de datos.
- Usa un indicador que define el comportamiento de los dispositivos de campo.
- La tecnología de transmisión permite un alto grado de seguridad y deja que los elementos de campo sean conectados al bus.
- Pueden ser integrados de una forma fácil en redes de trabajo PROFIBUS DP.

2.9 HMI

La sigla HMI es la abreviación en inglés de interfaz Hombre Maquina. Los sistemas HMI podemos pensarlos como una ventana de un proceso, ésta ventana puede estar en dispositivos especiales como paneles de operador o en una computadora, los sistemas HMI en computadoras se los conoce también como software HMI o de monitoreo y control de supervisión como indica la Fig. 9. Las señales del proceso son conducidas al HMI por medio de dispositivos como tarjetas de entrada y salida en la computadora, PLC's, RTU o variadores de velocidad de motores cuya comunicación debe ser entendida por el HMI.

Las funciones del HMI es de monitorear los datos de la planta en tiempo real, estos datos se pueden mostrar como números, texto o gráficos que permitan una lectura más fácil de interpretar. La supervisión permite junto con el monitoreo la posibilidad de ajustar las condiciones de trabajo del proceso directamente desde la computadora. Las alarmas tienen la capacidad de reconocer eventos excepcionales dentro del proceso y reportar estos eventos. Las alarmas son reportadas basadas en límites de control pre-establecidos. El control del HMI tiene la capacidad de aplicar algoritmos que ajustan los valores del proceso y así mantener estos valores dentro de ciertos límites, sin embargo, la aplicación de ésta función desde un software corriendo en una PC puede quedar limitada por la confiabilidad que quiera obtenerse del sistema. También tienen la capacidad de muestrear y almacenar en archivos, datos del proceso a una determinada frecuencia. Este almacenamiento de datos es una poderosa herramienta para la optimización y corrección de procesos.

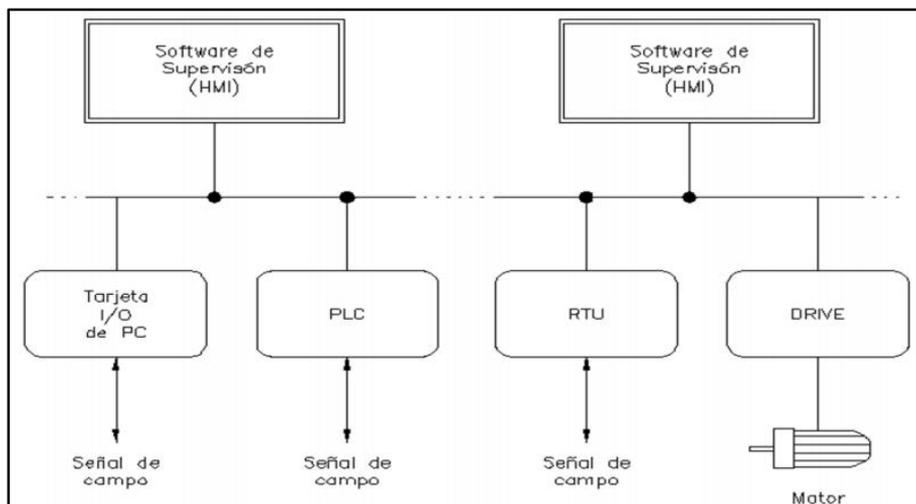


Figura 16: HMI

2.10 SCADA

2.10.1 Concepto Básico de Sistemas SCADA

Según Antonio Creus Solé (2005) “Los sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) son aplicaciones de software, diseñadas con la finalidad de controlar y supervisar procesos a distancia. Se basan en la adquisición de datos de los procesos remotos. Es una aplicación de software, especialmente diseñada para funcionar sobre ordenadores en el control de producción, proporcionando comunicación con los dispositivos de campo, controladores autónomos, autómatas programables, etc. controlando el proceso de forma automática desde una computadora, además, envía la información generada en el proceso productivo a diversos usuarios, tanto del mismo nivel como hacia otros supervisores dentro de la empresa, es decir, que permite la participación de otras áreas como por ejemplo: control de calidad, supervisión, mantenimiento, etc.

Cada palabra de SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de datos) involucran muchos subsistemas, por ejemplo, la adquisición de los datos puede estar a cargo de un PLC (Controlador Lógico Programable) el cual toma las señales y las envía a las estaciones remotas usando un protocolo determinado. Las tareas de Supervisión y Control generalmente están más relacionadas con el software SCADA, en el operador puede visualizar en la pantalla del computador de cada una de las estaciones remotas que conforman el sistema, los estados de ésta, las situaciones de alarma y tomar acciones físicas sobre algún equipo lejano, la comunicación se realiza mediante buses especiales o redes LAN. Todo esto se ejecuta normalmente en tiempo real, y están diseñados para dar al operador de planta la posibilidad de supervisar y controlar dichos procesos. Estos sistemas actúan sobre los dispositivos instalados en la planta, como son los controladores, autómatas, sensores, actuadores, registradores, etc. Además permiten controlar el proceso desde una estación remota, para ello el software brinda una interfaz gráfica que muestra el comportamiento del proceso en tiempo real”.

2.10.2 Funciones Principales Del Sistema SCADA

- a) Supervisión Remota De Instalaciones Y Equipos: Permite al operador conocer el estado de desempeño de las instalaciones y los equipos alojados en la planta, lo que permite dirigir las tareas de mantenimiento y estadística de fallas.
- b) Control Remoto De Instalaciones Y Equipos: Mediante el sistema se puede activar o desactivar los equipos remotamente (por ejemplo abrir válvulas, activar interruptores,

etc.) de manera automática y también manual, además, es posible ajustar parámetros, valores de referencia, algoritmos de control, etc.

- c) **Procesamiento De Datos:** El conjunto de datos adquiridos conforman la información que alimenta el sistema, esta información es procesada, analizada, y comparada con datos anteriores, y con datos de otros puntos de referencia, dando como resultado una información confiable y veraz.
- d) **Visualización Gráfica Dinámica:** El sistema es capaz de brindar imágenes en movimiento que representen el comportamiento del proceso, dándole al operador la impresión de estar presente dentro de una planta real. Estos gráficos también pueden corresponder a curvas de las señales analizadas en el tiempo.
- e) **Generación De Reportes:** El sistema permite generar informes con datos estadísticos del proceso en un tiempo determinado por el operador.
- f) **Representación Se Señales De Alarma:** A través de las señales de alarma se logra alertar al operador frente a una falla o la presencia de una condición perjudicial o fuera de lo aceptable. Estas señales pueden ser tanto visuales como sonoras.
- g) **Almacenamiento De Información Histórica:** Se cuenta con la opción de almacenar los datos adquiridos, esta información puede analizarse posteriormente, el tiempo de almacenamiento dependerá del operador o del autor del programa.
- h) **Programación De Eventos:** Esta referido a la posibilidad de programar subprogramas que brinden automáticamente reportes, estadísticas, gráfica de curvas, activación de tareas automáticas, etc.

2.11 TRASIEGO

Cambio de una cosa de un lugar a otro, especialmente de un líquido de un recipiente a otro.

[Web 04]

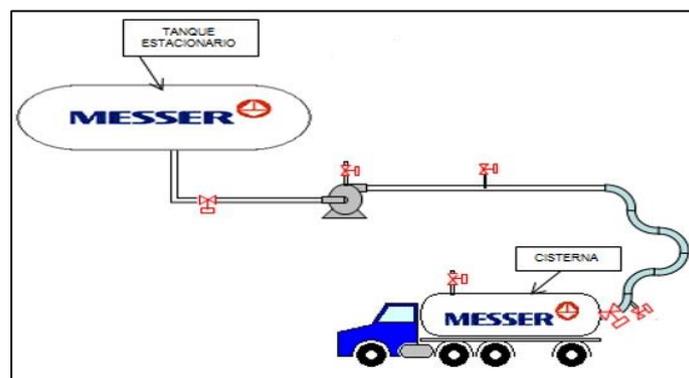


Figura 17: Trasiego

2.12 TANQUE CRIOGÉNICO

El tanque o termo criogénicos, se componen de un recipiente interior hecho de acero inoxidable y un recipiente exterior de acero inoxidable o de acero al carbono. El espacio entre los dos tanques está lleno de un súper aislamiento y un vacío de aproximadamente 10 micrones, lo que permite aislar el contenido del mismo a una temperatura de -183°C a -199° C. [Web 05]

TANQUE HORIZONTAL			
50000 GAL	NAT'L BD. NO. :	45411	
	CERTIFIED BY :		
U	TAYLOR - WHARTON		
	THEODORE, ALABAMA		
	MAWP :	76 PSI AT 100 °F	
W	MDMT :	-320 °F AT 76 PSI	
RT4	SERV. REST. TO : OPER. TEMP.		
ULT	LIQ. NITROGEN :	MINUS 285 °F	
	LIQ. OXYGEN :	MINUS 258 °F	
	LIQ. ARGON :	MINUS N/A	
MFR'S SERIAL NO. :	HT50000 U1256		
YEAR BUILT :	1999		
SH :	0.211 / 0.334	HD:	0.395
VESSEL P/N :	D2211324A	R :	ELL
FINAL PART NO. :	2211326		
MAX PRODUCT WT :	475500 LBS.		
CRN:			

Figura 18a: Tanque Criogénico

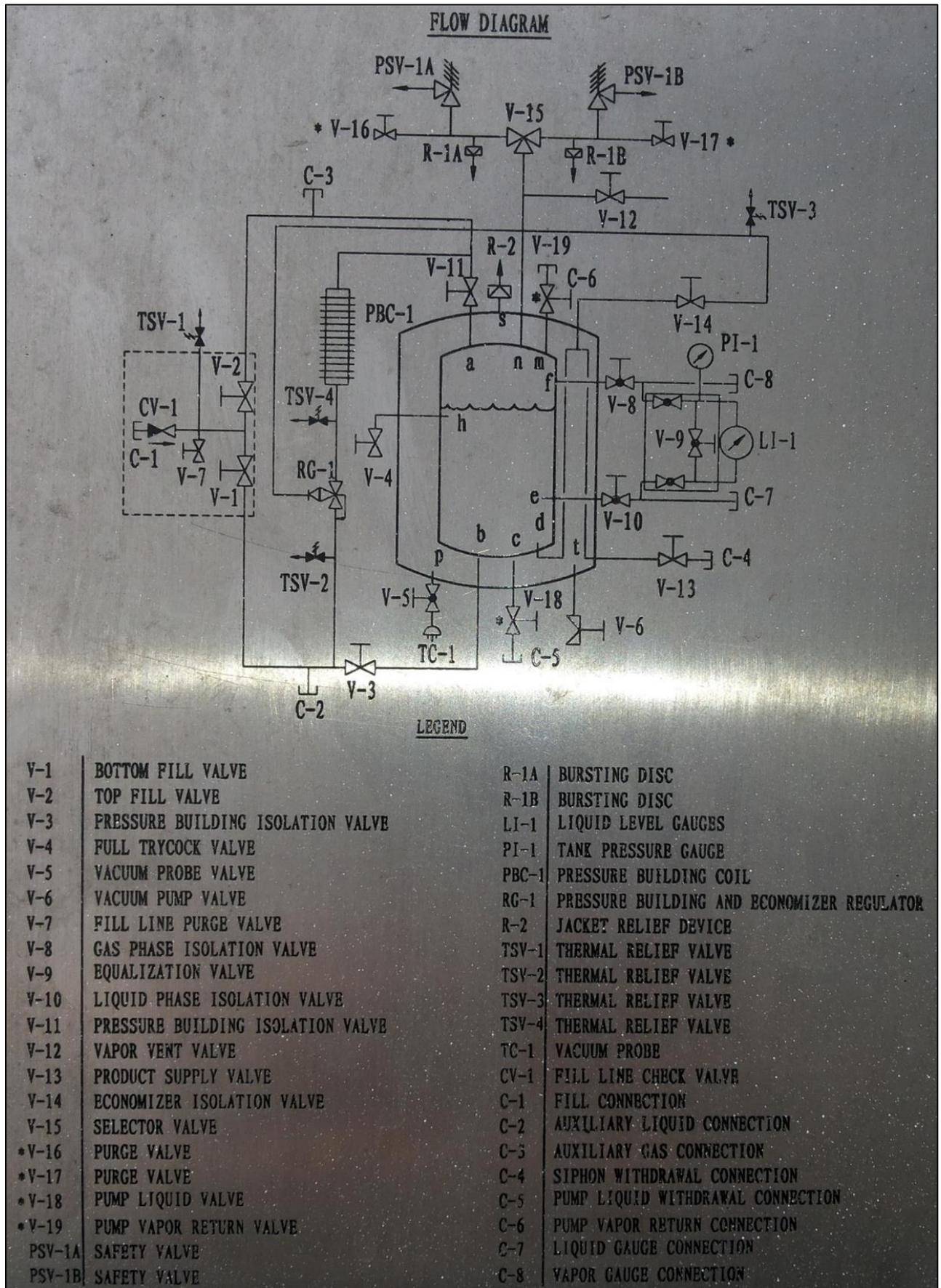


Figura 18b: Tanque Criogénico

2.12.1 Ventajas

- Suministro ininterrumpido con una alta confiabilidad, pues un tanque criogénico puede contener el equivalente de hasta 1000 cilindros de oxígeno a alta presión.
- Mayor seguridad. Los termos y tanques tienen oxígeno líquido almacenado a aprox. 8 a 10 bar (aprox. 135 psig) “baja presión”, los cilindros están a 200 bar (2900 psig), por lo que ya no existen los peligros asociados a la alta presión.

2.13 BOMBAS CRIOGÉNICAS

2.13.1 Aplicaciones:

Trasvase de elevados caudales de líquido entre cisternas móviles y tanques fijos, funcionamiento en proceso continuo y back-up. Procesos especiales en condiciones de diferencial de presión y caudal establecidos por el cliente. [Web 06]

2.13.2 Líquidos Trasvasados:

N₂, O₂, Ar, CO₂, N₂O.

2.13.3 Características Técnicas:

- Conjunción directa de la parte fría con el motor eléctrico.
- Mantenimiento rápida gracias a la simple sustitución de los componentes.
- Sello mecánico con componente de desgaste en rulón (Carbón para CO₂ y N₂O).
- Bajo nivel de ruido (<80 dB).
- Posibilidad de regulación mediante variador eléctrico.
- Panel eléctrico de control con posibilidad de pedido personalizado.
- Realización de sistemas automáticos en skid.

2.13.4 Accesorios:

- Filtro de aspiración.
- Flexible de aspiración.
- Flexible de salida.
- Brida de conexión a la bomba.
- Sensor PT100 de enfriamiento.
- Sello lift-up para servicio continuo.

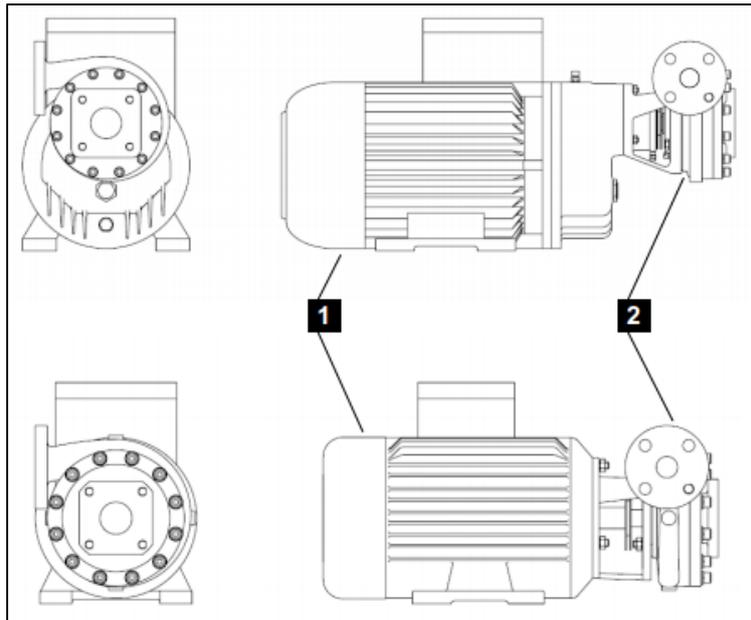


Figura 19a: Bombas Criogénicas

1. Unidad de accionamiento
2. Extremo frio

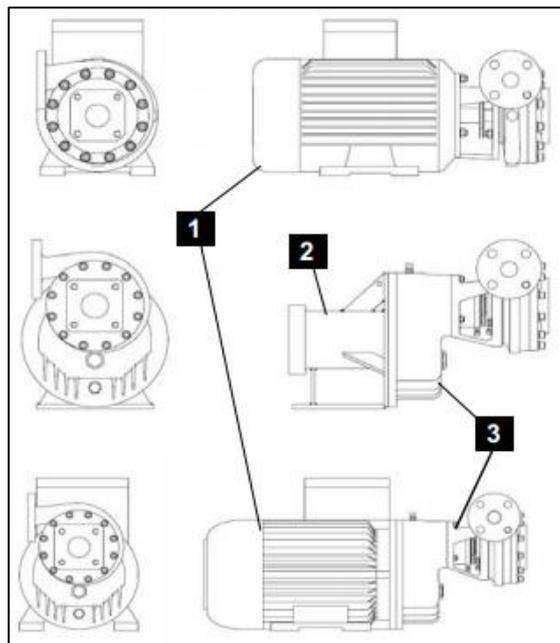


Figura 19b: Bombas Criogénicas

1. Motor eléctrico
2. Motor hidráulico
3. Aumento de velocidad de los engranajes

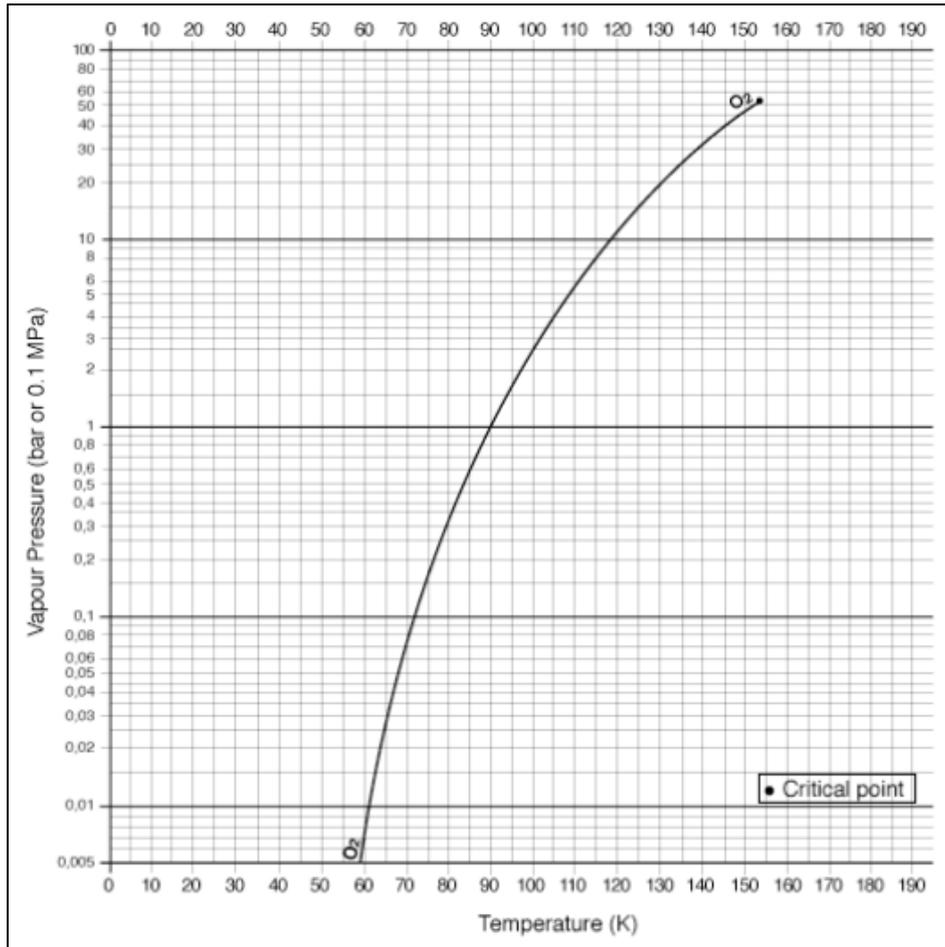


Figura 20: Presión de Vapor de Oxígeno

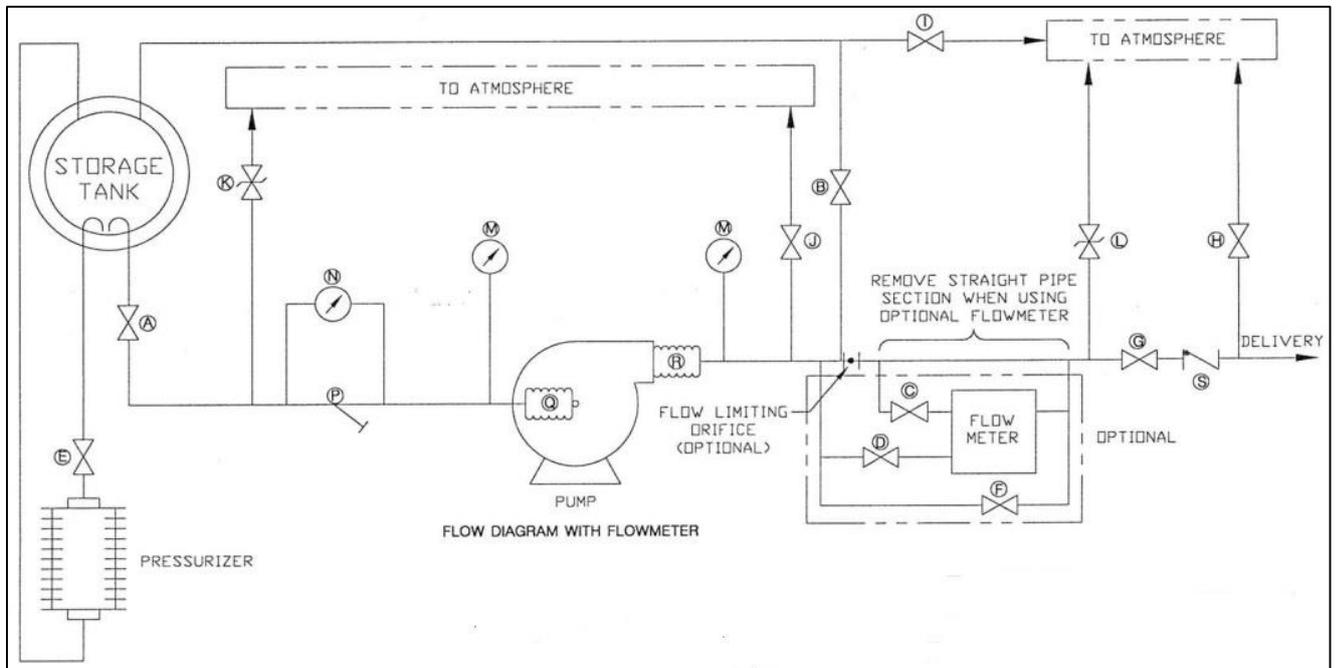


Figura 21: Ubicación de la bomba en el proceso de trasiego

Leyenda

LEGEND:	
A. MAIN SUCTION VALVE	J. RAPID PRIMING VALVE
B. PRIMING VALVE	K. RELIEF VALVE, SUCTION PRESSURE
C. METER INLET VALVE	L. RELIEF VALVE, DISCHARGE PRESSURE
D. METER COOLDOWN VALVE	M. PRESSURE GAUGE
E. PRESSURIZING VALVE	N. DIFFERENTIAL PRESSURE GAUGE
F. METER BYPASS VALVE	P. SUCTION STRAINER
G. DISCHARGE VALVE	Q. SUCTION FLEXIBLE LINE
H. BLEEDOFF VALVE	R. DISCHARGE FLEXIBLE LINE
I. VENT VALVE	S. CHECK VALVE

Figura 22: Leyenda

2.14 OXIGENO LIQUIDO

El oxígeno líquido, también conocido como LOX, se crea a partir de átomos de oxígeno que se fuerzan a asumir el estado líquido debido a la compresión y la modificación de la temperatura. Normalmente, el oxígeno prefiere ser un gas. Sus átomos requieren de mucho espacio, y no se asienta o concentra en su estado natural. Cuando estos átomos flotantes tocan otras superficies, se oxidan, combinándose con otros átomos que encuentran en el camino, y formando nuevas sustancias, de modo que el oxígeno puro ya no existe. Por estas razones, es difícil lograr oxígeno líquido, pero no imposible. Como muchos otros gases, si el oxígeno se enfría a una temperatura lo suficientemente baja, asumirá el estado líquido. Esto ocurre por el comportamiento del oxígeno gaseoso a bajas temperaturas. A medida que la temperatura desciende, los átomos se mueven más lentamente, ya que tienen menos energía para rebotar uno contra otros y mantenerse alejados entre sí. Cuanta menos energía tienen, sus rebotes son más cortos y sus vibraciones, más lentas. Cuando se enfrían lo suficiente, los átomos pierden tanta energía que les es más fácil asentarse en un estado líquido que mantener su forma gaseosa. A temperaturas muy por debajo del punto de congelación del agua, los átomos de oxígeno se reformarán, combinándose en patrones más densos y formando oxígeno líquido. El oxígeno líquido es de un color azul claro. [Web 01]

2.14.1 Producción de los Gases del Aire

Los gases del aire, nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂) y argón (Ar) se producen a partir de la destilación fraccionada del aire, mientras que el dióxido de carbono (CO₂) se encuentra en fuentes naturales (junto con hidrocarburos) o bajo la forma de subproducto de las industrias químicas y petroquímicas. [Web 01]

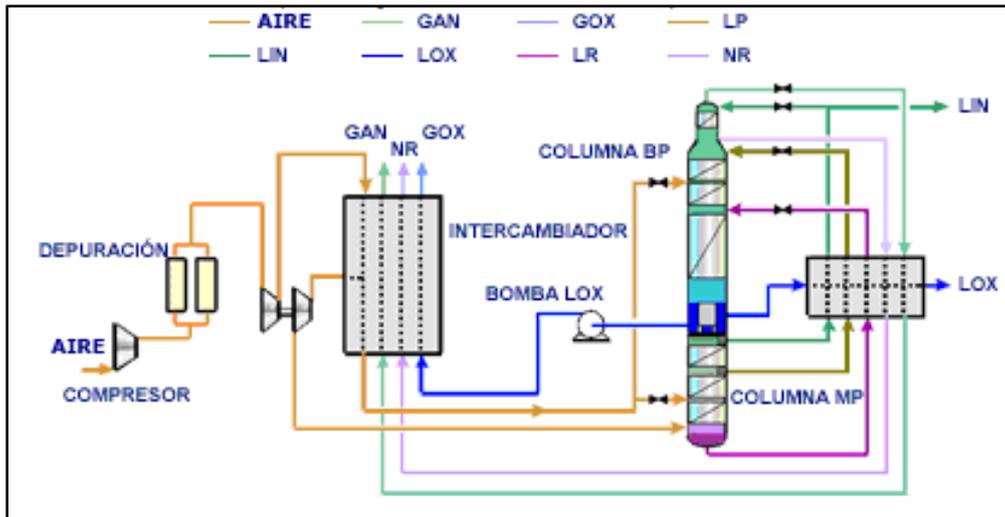


Figura 23: Producción del Oxígeno Líquido

2.14.2 Separación de los Gases de Aire

Los gases del aire: nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂) y argón (Ar) se producen por el método de destilación fraccionada del aire, cuando el dióxido de carbono (CO₂) se obtiene a partir de fuentes naturales (hidrocarburos) o bajo la forma de subproducto de las industrias químicas y petroquímicas. [Web 01]

El aire es una mezcla de gases formada por aproximadamente un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno, un 0,9% de argón y un 0,1% de gases nobles. Para poder separarlos se recurre al método de destilación fraccionada, a través del cual la mezcla gaseosa se licua mediante la disminución de la temperatura y el aumento de la presión.

La obtención de los principales componentes del aire constituye un método industrial, veamos cómo es posible este proceso:

- Primero el aire seco se convierte en aire líquido a través de la refrigeración a (-173°C);
- El aire licuado se transfiere entonces a la columna de fraccionamiento;
- En la columna existen compartimentos con distintas temperaturas, donde cada componente se separa de acuerdo con su temperatura de ebullición (T. E.)
- Los productos resultantes del proceso son:
 - Oxígeno líquido (O₂) T.E. = (-183 °C)
 - Argón líquido (Ar) T.E. = (-186 °C)
 - Nitrógeno líquido (N₂) T.E. = (-198 °C)

- Los gases obtenidos tienen aplicación en los más variados sectores de actividad, desde la salud a la alimentación, pasando por la electricidad, metalurgia, química, petroquímica, pasta y papel, medio ambiente, etc.

2.15 VÁLVULAS CRIOGÉNICAS

2.15.1 Válvulas criogénicas tipo globo

Las válvulas de la serie BK y BKA están diseñados exclusivamente para el manejo de líquidos criogénicos en los tanques de almacenamiento a granel, transportes, y tuberías. Estas válvulas de globo proporcionan positivo cierre y ofrecen una vida útil prolongada y de bajo mantenimiento. Las válvulas están disponibles con una variedad de conexiones y longitudes de tallo de entrada y salida. Se ofrecen Ciertas válvulas BK con soldadura fuerte en Sch 5 tubos de acero inoxidable Stubs. [Web 07]

2.15.1.1 Características

- Disco de asiento CTFE² y diseño del asiento giratorio ofrecen un cierre positivo, mínimo desgaste del asiento y una larga vida útil.
- Embalaje superior de resorte único proporciona extendida vida de servicio sin ajuste.
- Una pieza slip-on conjunto de asiento para un fácil reemplazo.
- Cada válvula es una prueba de presión a ser libre de fugas.
- Presión máxima de trabajo es de 600 psig.
- Rango de temperatura es de -320 °F a 165 °F.

2.15.1.2 Materiales

- Cuerpo.....Bronce
- Cuerpo y bonete.....Latón
- Asiento disco.....CTFE
- Asiento conjunto de retención.....Latón
- Tallo y bonnet tubo de extensión.....Acero inoxidable
Jam anillo y anillos de sello de presión.....PTFE
- Alta Bonnet, empaquetadura.....Latón
- Volante.....Aluminio para un máximo de 1" tamaño de la válvula, revestido de hierro maleable para los tamaños más grandes.

² CTFE, Termoplástico a base de flúor que ofrece un equilibrio único de propiedades que facilitan el excelente trabajo y moldeabilidad

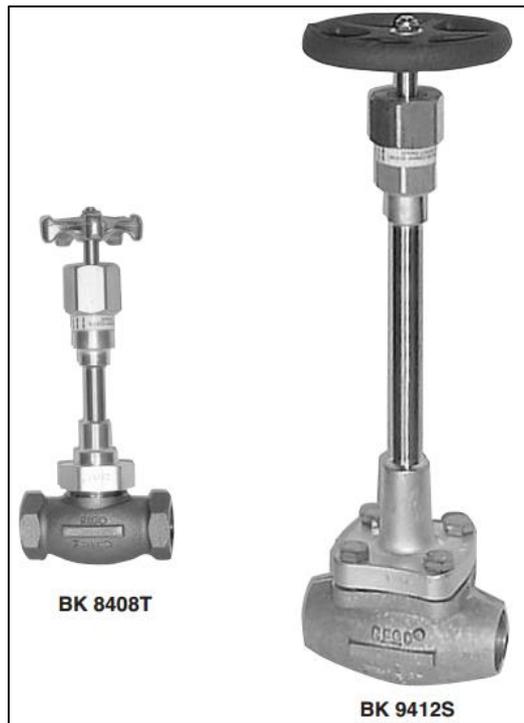


Figura 24a: Válvulas Criogénicas

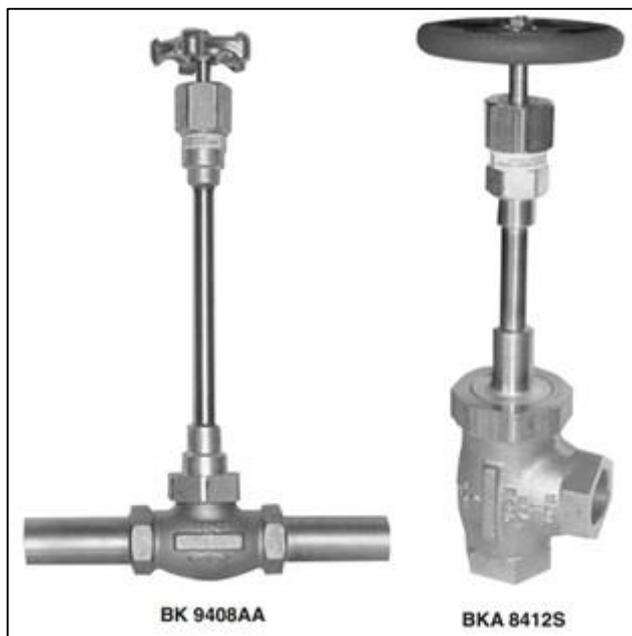


Figura 24b: Válvulas Criogénicas

2.15.1.3 BK y BKA Series de Válvulas

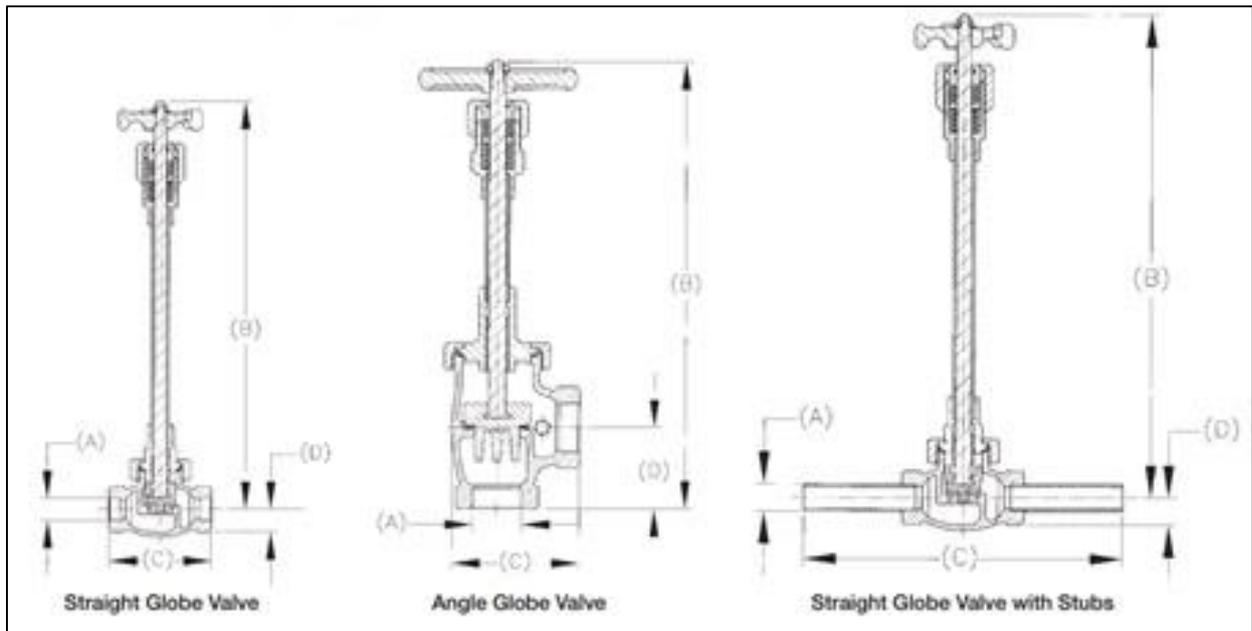


Figura 25: BK y BKA Series de Válvulas

Part Number	Body Style	Inlet / Outlet Connections A	Height Open B (Approx.)	Length C	D	Cv Factor	
BK8404S	Straight	.631"-.634"	9 ⁵ / ₃₂ "	3 ¹ / ₁₆ "	1"	4.7	
BK8404T		1/2" F.NPT					
BK8404ST		.631"-.634"x 1/2" F.NPT					
BK9404S		.631"-.634"	14 ¹ / ₂ "	3 ¹ / ₁₆ "	1"	4.7	
BK9404T		1/2" F.NPT					
BK9404AA		1/2" Sch5 Pipe					
BK9404PT-F30		1/2" Sch5 Pipe x 1/2" F.NPT	9 ⁵ / ₃₂ "	3 ¹ / ₁₆ "	1"	6.7	
BK9404ST		.631"-.634"x1/2" F.NPT					
BK8406S		.881"-.884"					
BK8406T		3/4" F.NPT	14 ¹ / ₂ "	3 ¹ / ₁₆ "	1"	6.7	
BK9406S		.881"-.884"					
BK9406T		3/4" F.NPT					
BK8408S		1.131"-1.134"	9 ⁵ / ₃₂ "	4 ⁵ / ₁₆ "	1 ¹ / ₈ "	11.2	
BK8408T		1" F.NPT					
BK9408S		1.131"-1.134"					
BK9408T		1" F.NPT	16 ⁷ / ₁₆ "	5 ³ / ₁₆ "	1 ¹ / ₂ "	25.1	
BK9408AA		1" Sch5 Pipe					
BK9408PT-F30		1" Sch5 Pipe x 1" F.NPT					
BK9410S*		1.378"-1.380"	16"	6"	1 ³ / ₈ "	41	
BK9412S*		1.631"-1.634"					
BK9412T*		1 1/2" F.NPT					
BK9412AA		1 1/2" Sch5 Pipe	13"	4 ¹ / ₂ "	1 ³ / ₄ "	30.0	
BK9412PT-F30		1 1/2" Sch5 Pipe x 1 1/2" F.NPT					
BK9416S*		2.131" - 2.134"					
BK9416T*		2" F.NPT	11 ¹ / ₄ "	3 ³ / ₄ "	1 ³ / ₄ "	14.5	
BK9416PT-F30		2" Sch5 Pipe x 2" F.NPT					
BKA8408S		Angle	1.131" - 1.134" x 1.631" - 1.634"	11 ¹ / ₄ "	3 ³ / ₄ "	1 ³ / ₄ "	14.5
BKA9408S			1.631"-1.634"	14 ⁵ / ₁₆ "	4 ¹ / ₂ "	1 ³ / ₄ "	30.0
BKA8412S			1.631"-1.634"	13"	4 ¹ / ₂ "	1 ³ / ₄ "	30.0

Figura 26: Información de Dimensiones

2.15.2 Válvulas Criogénicas Tipo Check

Las válvulas de la serie 8500 están diseñados para su uso como una válvula de retención en grandes estaciones granal criogénicos y tuberías criogénicas. [Web 07]

2.15.2.1 Características

- Reemplazables discos de asiento Kel-F.
- Tapa de auto-centrado sostiene el émbolo³ en su posición.
- Cada válvula se limpian para el oxígeno líquido.
- Rango de temperatura de trabajo es de -320 ° F a + 165 ° F
- Presión máxima de trabajo es de 600 PSIG.
- Presión grieta 2 PSI.

2.15.2.2 Materiales

- Cuerpo.....Bronce
- Cap.....Latón o Bronce
- El embolo.....Latón
- Asiento.....CTFE



Figura 27: 8500 Series

³ Émbolo, Pieza de una bomba o del cilindro de un motor que se mueve hacia arriba o hacia abajo impulsando un fluido o bien recibiendo el impulso de él.

Part Number	Inlet / Outlet Connection A	B	Length C	Cv Factor
BK8508S	1.128"-1.130"	2¼"	4⅝"	10
BK8508T	1" F.NPT			
BK8512S	1.629"-1.631"	3¼"	5⅜"	27
BK8512T	1½" F.NPT			

Figura 28a: Información de Dimensiones

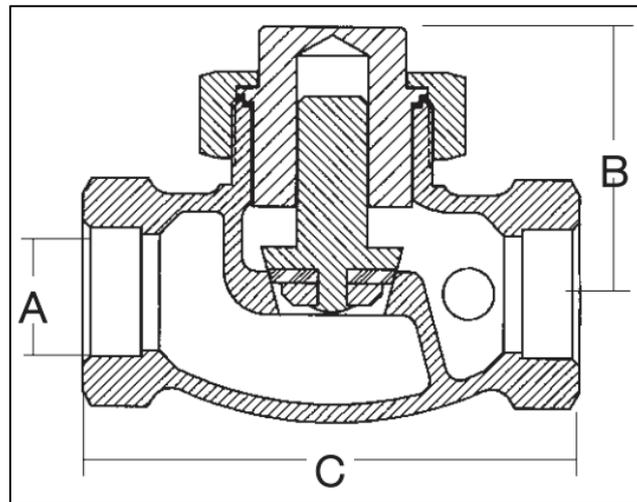


Figura 28b: Información de Dimensiones

2.16 VARIADORES DE VELOCIDAD

Los variadores de velocidad son dispositivos electrónicos que permiten variar la velocidad y la cupla de los motores asíncronos trifásicos, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables. [Web 08]

Se utilizan estos equipos cuando las necesidades de la aplicación sean:

- Dominio de par y la velocidad
- Regulación sin golpes mecánicos
- Movimientos complejos
- Mecánica delicada

Los variadores de velocidad están preparados para trabajar con motores trifásicos asíncronos de rotor jaula. La tensión de alimentación del motor no podrá ser mayor que la tensión de red.

La tensión y frecuencia de placa del motor se comporta de acuerdo al gráfico siguiente:

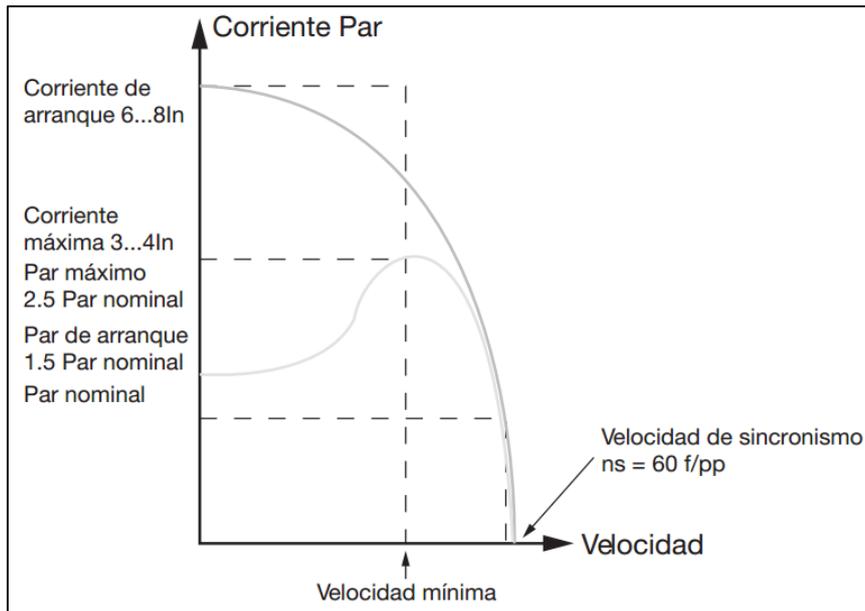


Figura 29: Tensión Vs Frecuencia

El dimensionamiento del motor debe ser tal que la cupla⁴ resistente de la carga no supere la cupla nominal del motor, y que la diferencia entre una y otra provea la cupla acelerante y desacelerante suficiente para cumplir los tiempos de arranque y parada. [Web 08]

2.16.1 El Convertidor de Frecuencia

Se denominan así a los variadores de velocidad que rectifican la tensión alterna de red (monofásica o trifásica), y por medio de seis transistores⁵ trabajando en modulación de ancho de pulso generan una corriente trifásica de frecuencia y tensión variable. Un transistor más, llamado de frenado, permite direccionar la energía que devuelve el motor (durante el frenado regenerativo) hacia una resistencia exterior. A continuación se muestra un diagrama electrónico típico:

⁴ Cupla, o también conocido como torque es la fuerza que producen los cuerpos en rotación

⁵ Transistor, dispositivo semiconductor que cierra o abre un circuito o amplifica una señal; se emplea en circuitos integrados para generar bits (ceros y unos).

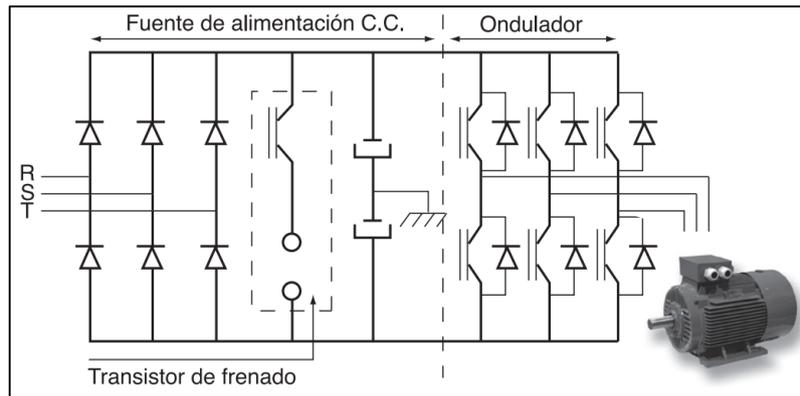


Figura 30a: Tensión Vs Frecuencia

La estrategia de disparo de los transistores del ondulator es realizada por un microprocesador que, para lograr el máximo desempeño del motor dentro de todo el rango de velocidad, utiliza un algoritmo de control vectorial de flujo. [Web 08]

Este algoritmo por medio del conocimiento de los parámetros del motor y las variables de funcionamiento (tensión, corriente, frecuencia, etc.), realiza un control preciso del flujo magnético en el motor manteniéndolo constante independientemente de la frecuencia de trabajo. Al ser el flujo constante, el par provisto por el motor también lo será. [Web 08]

En el gráfico se observa que desde 1Hz hasta los 50 Hz el par nominal del motor

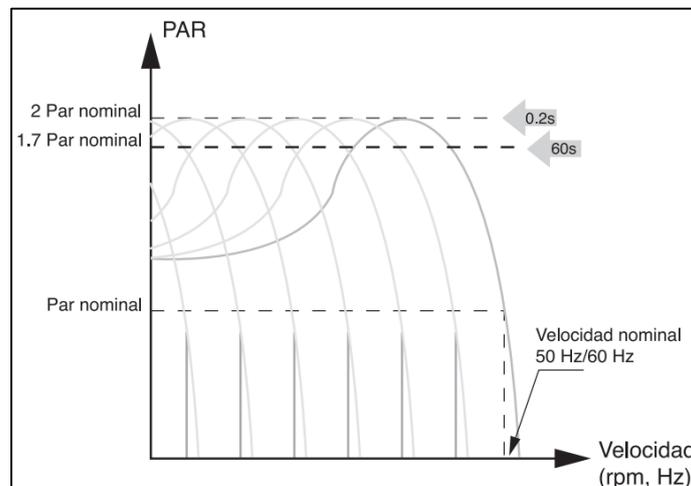


Figura 30b: Tensión Vs Frecuencia

2.16.2 Selección de un variador de velocidad

Para definir el equipo más adecuado para resolver una aplicación de variación de velocidad, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Tipo de carga: Par constante, par variable, potencia constante, cargas por impulsos.

- Tipo de motor: De inducción rotor jaula de ardilla o bobinado, corriente y potencia nominal, factor de servicio, rango de voltaje.
- Rangos de funcionamiento: Velocidades máximas y mínimas. Verificar necesidad de ventilación forzada del motor.
- Par en el arranque: Verificar que no supere los permitidos por el variador. Si supera el 170% del par nominal es conveniente sobredimensionar al variador.
- Frenado regenerativo: Cargas de gran inercia, ciclos rápidos y movimientos verticales requieren de resistencia de frenado exterior.
- Condiciones ambientales: Temperatura ambiente, humedad, altura, tipo de gabinete y ventilación.
- Aplicación multimotor: Prever protección térmica individual para cada motor. La suma de las potencias de todos los motores será la nominal del variador.
- Consideraciones de la red: Microinterrupciones, fluctuaciones de tensión, armónicas, factor de potencia, corriente de línea disponible, transformadores de aislamiento.
- Consideraciones de la aplicación: Protección del motor por sobretensión y/o sobrecarga, contactor de aislamiento, bypass, re arranque automático, control automático de la velocidad.
- Aplicaciones especiales: Compatibilidad electromagnética, ruido audible del motor, bombeo, ventiladores y sopladores, izaje, motores en paralelo, etc.

2.16.3 Circuito Recomendado

El circuito para utilizar un variador debe constar con algunos de los siguientes elementos:

- Interruptor automático: La corriente de línea corresponde a la corriente absorbida por el variador a la potencia nominal de utilización, en una red impedante que limite la corriente de cortocircuito a:
 - 22 kA para una tensión de alimentación de 400v-0Hz.
 - 65 kA para una tensión de alimentación de 40v-0Hz.
- Contactor de línea: Este elemento garantiza un seccionamiento automático del circuito en caso de una emergencia o en paradas por fallas. Su uso junto con el interruptor automático garantiza la coordinación tipo de la salida y facilita las tareas de puesta en marcha, explotación y mantenimiento. La selección es en función de la potencia nominal y de la corriente nominal del motor en servicio S1 y categoría de empleo AC1

- Inductancia de línea: Estas inductancias permiten garantizar una mejor protección contra las sobretensiones de red, y reducir el índice de armónicos de corriente que produce el variador, mejorando a la vez la distorsión de la tensión en el punto de conexión. Esta reducción de armónicos determina una disminución del valor rms de corriente tomado de la fuente de alimentación, y una reducción del valor rms de corriente tomado por los componentes de la etapa de entrada del inversor (rectificador, contactor de precarga, capacitores). La utilización de inductancias de línea está especialmente recomendada en los siguientes casos:
 - Red muy perturbada por otros receptores (parásitos, sobretensiones)
 - Red de alimentación con desequilibrio de tensión entre fases $>1,8\%$ de la tensión nominal.
 - Variador alimentado por una línea muy poco impedante (cerca de transformadores de potencia superior a 10 veces el calibre del variador). La inductancia de línea mínima corresponde a una corriente de cortocircuito I_{cc} de 22000 A
 - Instalación de un número elevado de convertidores de frecuencia en la misma línea.
 - Reducción de la sobrecarga de los condensadores de mejora del $\cos \phi$, si la instalación incluye una batería de compensación de factor de potencia.
 - La selección es de acuerdo a la corriente nominal del variador y su frecuencia de conmutación. Existen inductancias estándar para cada tipo de variador.

- Filtro de radio perturbaciones: estos filtros permiten limitar la propagación de los parásitos que generan los variadores por conducción, y que podrían perturbar a determinados receptores situados en las proximidades del aparato (radio, televisión, sistemas de audio, etc.).
Estos filtros sólo pueden utilizarse en redes de tipo TN (Puesta al neutro) y TT (neutro a tierra).

- Resistencia de frenado: Su función es disipar la energía de frenado, permitiendo el uso del variador en los cuadrantes 2 y 4 del diagrama par velocidad. De este modo se logra el máximo aprovechamiento del par del motor, durante el momento de frenado y se conoce como frenado dinámico.
Normalmente es un opcional ya que sólo es necesaria en aplicaciones donde se necesitan altos pares de frenado.

La instalación de esta resistencia es muy sencilla: se debe ubicar fuera del gabinete para permitir su correcta disipación, y el variador posee una bornera donde se conecta directamente. De acuerdo al factor de marcha del motor se

determina la potencia que deberá disipar la resistencia. Existen tablas para realizar esta selección. El valor óhmico de la resistencia es característico del variador y no debe ser modificado.

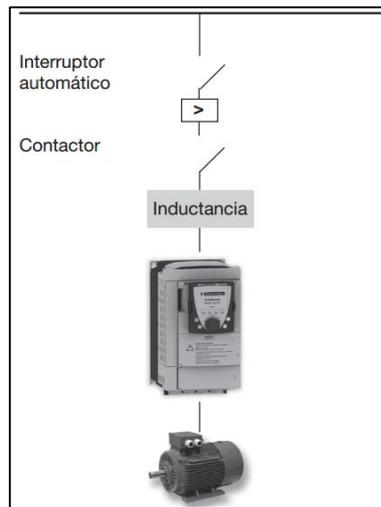


Figura 31: Instalación del Convertidor de Frecuencia

- Recomendaciones de Instalación:
 - Cableado:
 - ✓ En los cables de control, utilizar cable trenzado y blindado para los circuitos de consigna.
 - ✓ Debe haber una separación física entre los circuitos de potencia y los circuitos de señales de bajo nivel.
 - ✓ La tierra debe ser de buena calidad y con conexiones de baja impedancia.
 - ✓ Cables con la menor longitud posible.
 - ✓ El variador debe estar lo más cerca posible del motor.
 - ✓ Cuidar que los cables de potencia estén lejos de cables de antenas de televisión, radio, televisión por cable o de redes informáticas.
 - Gabinete:

Metálico o al menos en una bandeja metálica conectada a la barra de tierra. En los manuales de uso de los variadores se hacen las recomendaciones en cuanto al tamaño.

- Ventilación:

Debe estar de acuerdo al calor disipado por el equipo a potencia nominal. Se proveen, como opcionales, ventiladores adicionales y kits de montaje de ventilación que garantizan una protección IP54 sin perder la posibilidad de una buena disipación.

- Puesta a tierra:

La tierra debe ser de buena calidad y con conexiones de baja impedancia. Se deberá realizar la conexión a tierra de todas las masas de la instalación, así como las carcasas de los motores eléctricos. El sistema de puesta a tierra deberá tener una resistencia de un valor tal que asegure una tensión de contacto menor o igual a 24V en forma permanente.

2.17 TERMOCUPLAS

Las termocuplas son el sensor de temperatura mas común utilizado industrialmente. Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño del orden de los milivolts el cual aumenta con la temperatura. Normalmente las termocuplas industriales se consiguen encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable y otro material (vaina), en un extremo esta la union y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido adentro de una caja redonda de aluminio (cabezal).

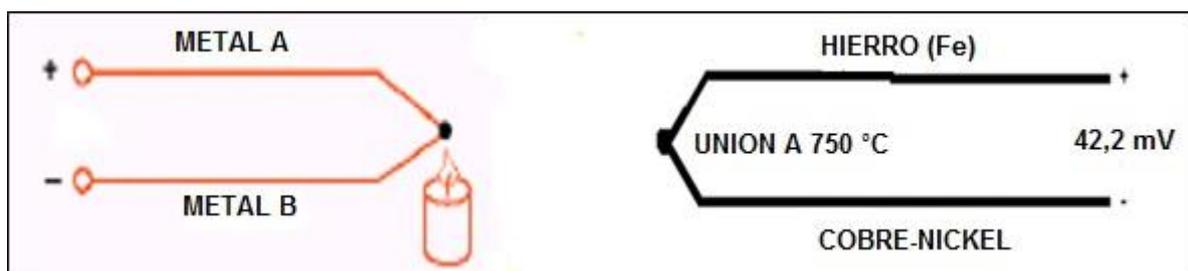


Figura 32: Termocuplas

2.17.1 Tipos de Termocuplas

Existen una infinidad de tipos de termocuplas, en la tabla aparecen algunas de las más comunes, pero casi el 90% de las termocuplas utilizadas son del tipo J o del tipo K. Las termocuplas tipo J se usan principalmente en la industria del plástico, goma (extrusión e inyección) y fundición de metales a bajas temperaturas (Aluminio).

La termocupla K se usa típicamente en fundición y hornos a temperaturas menores de 1300 °C, por ejemplo fundición de cobre y hornos de tratamientos térmicos.

Las termocuplas R, S, B se usan casi exclusivamente en la industria siderúrgica (fundición de acero)

Finalmente las del tipo T eran usadas hace algún tiempo en la industria de alimentos, pero han sido desplazadas en esta aplicación por los Pt100.

2.17.2 Características de las Termocuplas

TIPO	TERMOCUPLA	INTERVALO DE MEDIDA	ERROR MAX	VOLT MAX (mV)
B	Platino 70% Rodio 30% (+) Platino 94% Rodio 6% (-)	0...1820 °C	± 1.5 °C ± 0.25 %	13.814
J	Hierro (+) Constantan (Cobre/Níquel) (-)	-480...750 °C	± 2.5 °C ± 0.75 %	42.2
K	Níquel/Cromo (NiCr) (+) Níquel/Aluminio (Ni)(-)	-480...1372 °C	± 2.5 °C ± 0.75 %	54.8
R	Platino 87% Rodio 13% (+) Platino 100% (-)	0...1767 °C	± 1.5 °C ± 0.25 %	21.09
S	Platino 90% Rodio 10% (+) Platino 100% (-)	0...1767 °C	± 1.5 °C ± 0.25 %	18.68
T	Cobre (+) Constantan (Cobre/Níquel) (-)	-200...400 °C	± 1 °C ± 0.75 %	20.8

Tabla 1: Características de las Termocuplas

2.17.3 Termoresistencia (RTD)

Dispositivo Termo Resistivo (RTD), depende de las características de resistencia en función de la temperatura del metal con el que se efectúa la medida. Usualmente consiste en un arrollamiento de hilo conductor muy fino bobinado entre capas de aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o cerámica. [Web 09]



Figura 33: RTD

Por lo general se ha considerado al PLATINO que es el material más adecuado desde el punto de vista de precisión y estabilidad. En general la RTD de resistencia de platino usada en la industria tiene una resistencia de 100 ohm a 0 °C, estas RTD se denominan Pt100 y también pueden ser de níquel o cobre (muy baja resistencia), también existen Pt1000, Pt500 y Pt10, ya en desuso, en particular las dos últimas. [Web 09]

2.17.3.1 PT 100:

Es un sensor y uno de los tipos de RTD, Consiste en un alambre de platino que a 0 °C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. El incremento de la resistencia no es lineal pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde.

Normalmente las Pt100 industriales se consiguen encapsuladas en la misma forma que las termocuplas, es decir dentro de un tubo de acero inoxidable y otro material (vainas), en un extremo está el elemento sensible (alambre de platino) y en el otro está el terminal eléctrico de los cables protegidos dentro de una caja redonda de aluminio (Cabezal). [Web 09]

2.17.3.1.1 Modos De Conexión De Un PT-100

Existen 3 modos de conexión para las Pt100, cada uno de ellos requiere un instrumento lector distinto.

El objetivo es determinar exactamente la resistencia eléctrica $R(t)$ del elemento sensor de platino sin que influya en la lectura la resistencia de los cables R_c . [Web 09]

Con 2 hilos:

El modo más sencillo de conexión (pero menos recomendado) es con solo dos cables. En este caso las resistencias de los cables R_{c1} y R_{c2} que unen la Pt100 al instrumento se suman generando un error inevitable. El lector medirá el total $R(t)+R_{c1}+R_{c2}$ en vez de $R(t)$. Lo único que se puede hacer es usar cable lo más grueso posible para disminuir la resistencia de R_{c1} y R_{c2} y así disminuir el error en la lectura. [Web 09]

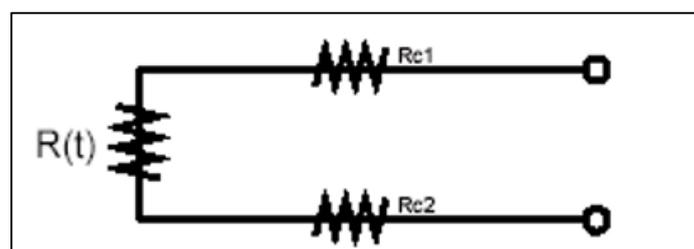


Figura 34: Conexión de un PT-100 Con Dos Hilos

Con 3 hilos:

El modo de conexión de 3 hilos es el más común y resuelve bastante bien el problema de error generado por los cables.

El único requisito es que los tres cables tengan la misma resistencia eléctrica. Por supuesto el lector de temperatura debe ser para este tipo de conexión.

En el cual se hace pasar una corriente conocida a través de los cables azul y verde con lo cual el instrumento mide $2R_c$. Luego mide la resistencia por los cables café y azul para finalmente restarle $2R_c$ al valor medido y obtener $R(t)$. [Web 09]

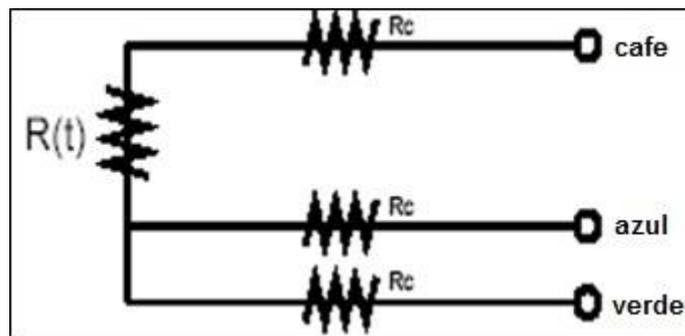


Figura 35: Conexión de un PT-100 Con Tres Hilos

Con 4 hilos:

El método de 4 hilos es el más preciso de todos, los 4 cables pueden ser distintos (distinta resistencia) pero el instrumento lector es más costoso.

Por los cables 1 y 4 se hace circular una corriente I conocida a través de $R(t)$ provocando una diferencia de potencial V en los extremos de $R(t)$.

Los cables 2 y 4 están conectados a la entrada de un voltmetro de alta impedancia luego por estos cables no circula corriente y por lo tanto la caída de potencial en los cables R_{c2} y R_{c3} sera cero y el voltmetro medira exactamente el voltaje V en los extremos del elemento $R(t)$. Finalmente el instrumento obtiene $R(t)$ al dividir V medido entre la corriente I conocida. [Web 09]

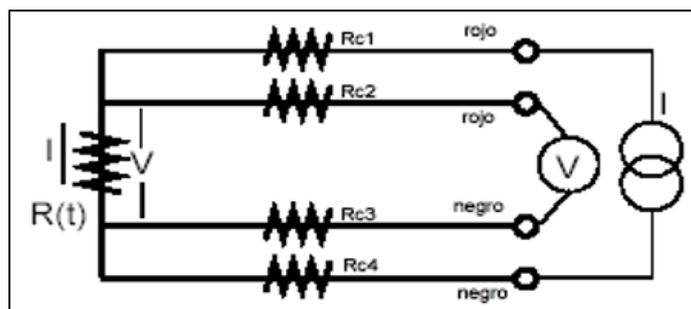


Figura 36: Conexión de un PT-100 Con Cuatro Hilos

2.17.3.2 Cualidades de una termocupla

- cuando la temperatura excede 400 °C
- cuando se requiere un tiempo de respuesta rápido
- cuando el lugar de medida requiere un termómetro muy pequeño o delgado (< 1 mm)
- cuando una longitud suficiente de inmersión no puede ser realizado
- cuando se espera choques o vibraciones

2.17.3.3 Cualidades de un RTD

- cuando se requiere una precisión alta
- cuando la temperatura a medir está bajo de 400 °C
- cuando no se requiere un tiempo de respuesta rápido
- cuando no se espera choques o vibraciones
- cuando se quiere evitar todos los problemas eléctricos, que pueden ocurrir utilizando termopares (menos fuentes de errores)

2.18 TRANSMISORES

Son instrumentos que captan la variable de proceso y la transmiten a distancia a un instrumento receptor, sea un indicador, un control remoto PLC (MOORE). Estos equipos cuyas señales transmitidas son electrónicas y son las más empleadas en la industria, incorporan un microprocesador que mejora las prestaciones del sensor y/o permite la comunicación a distancia a través de un sistema de control, ordenadores compatibles, etc.).

Estos generan varios tipos de señales eléctricas de corriente Entre las más empleadas son de 4-20 mA y 0-20 mA.

Donde la señal electrónica de 4 a 20 mA tiene un nivel suficiente y de compromiso entre la distancia de transmisión y la robustez del equipo. Su utilización comporta ventajas en cuanto a la calidad y cantidad de la información, aunque su coste es más elevado dando como resultado un diagrama de control de lazo cerrado. [Web 09]

2.18.1 Modelo 1151

Medición de presión diferencial, absoluta y manométrica o de nivel en líquidos. [Web 09]

- Medición de presión diferencial, absoluta y manométrica o de nivel en líquidos.
- Rangos desde 0-2 pulg H₂O a 0-6000 Psig.
- La tecnología basada en microprocesador garantiza un mejor funcionamiento y

fiabilidad, proporciona una interface bidireccional fácil entre el campo y la sala de control.

- Protocolo digital Hart.



Figura 37: Modelo 1151

2.18.2 Modelo 3051

Prestaciones inigualables de operación, una plataforma coplanar flexible y una orientación de futuro. [Web 09]

- Precisión +/- 0.075% span
- Error total probable: 0.15% span
- Rangeabilidad 100:1
- Manifold integrado
- La respuesta más rápida de un transmisor de presión inteligente
- Maneja presiones manométricas, absolutas y diferenciales
- Salida Fieldbus, Hart y 4-20 mA.



Figura 38: Modelo 3051

2.19 CRIOGENIA

Según Kirk (1999). Es la técnica utilizada para la producción y utilización de bajas temperaturas. Se usa para producir gases de alta pureza a bajo costo por medio de la condensación y la destilación fraccionada, y para refrigerar materiales o alterar sus propiedades físicas.

La aplicación práctica de la criogenia comenzó con la separación del aire. Las plantas de separación de aire producen oxígeno, nitrógeno, argón y si se desea también se pueden obtener los gases nobles de neón, criptón y xenón. El intercambiador de calor principal de conmutación es el núcleo de la planta básica de separación de aire. El aire se comprime hasta 700 kPa (aproximadamente 100 psi) en el compresor. El intercambiador principal enfría previamente al aire utilizando para ello las corrientes efluentes de productos y extrae el dióxido de carbono y la humedad por solidificación y condensación; el expansor proporciona el enfriamiento del proceso. Las columnas de alta y baja presión separan los componentes primarios, oxígeno y nitrógeno, y concentran el argón. La columna de argón crudo separa aún más el argón del oxígeno.

2.19.1 Acumulación de Refrigeración con Empleo de Intercambiadores de Calor

Según Linde (1978). El enfriamiento de la planta avanza en etapa, ya que ninguna expansión del aire teniendo una temperatura ambiente rebajaría su temperatura lo suficiente para licuarlo. Sin embargo, usando los intercambiadores para intercambiar calor entre el aire que ingresa y el aire expandido a baja presión, se retiene en la planta el enfriamiento logrado en cada etapa de expansión, hasta que finalmente el aire a alta presión se enfría lo suficiente para formar líquido cuando se expande.

2.19.2 Sistema de Linde de Columna Simple para la Separación del Aire

Según Perry (1998). De los esquemas de operación disponibles para la separación del aire, el más simple es conocido como sistema de Linde de columna simple, introducido por primera vez en 1902. En este sistema el aire puro comprimido pasa a través de un intercambiador de calor para su pre enfriamiento, después se pasa a través de un serpentín en el calentador de la columna de rectificación, donde tiene lugar un enfriamiento adicional (actuando al mismo tiempo como la fuente de calor del calentador).

Luego tiene lugar una rectificación, con lo cual se obtiene el producto gaseoso o líquido, según sea el caso. Si este producto es oxígeno en fase gaseosa, el aire debe comprimirse y liberarse a presiones entre 3 y 6 MPa; si es líquido, es necesario tener presiones de 20 MPa.

Lamentablemente, en un proceso de columna simple, aunque la pureza de oxígeno sea alta, la corriente de nitrógeno es impura. La concentración de vapor en equilibrio para una mezcla que tiene una composición inicial de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno a 100 kPa de presión, es aproximadamente del 6 a 7% de oxígeno, es decir, la corriente de nitrógeno tendrá una impureza de oxígeno de esa magnitud, con lo que no es útil para ninguna aplicación de nitrógeno puro en fase gaseosa.

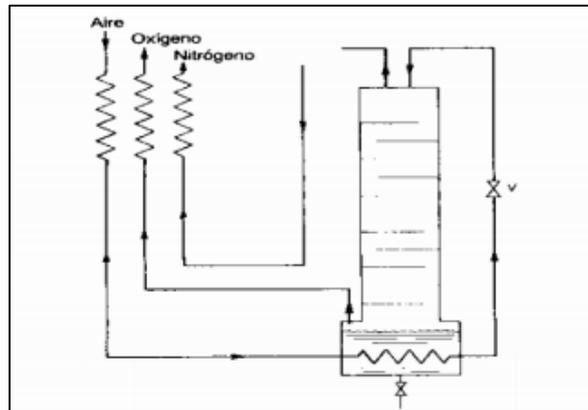


Figura 39: Columna de Linde Simple para Separación de Aire

2.19.3 Sistema de Linde de Columna Doble para Separación de Aire

Según Perry (1998). El problema de la impureza indicado en el sistema de columna simple, fue resuelto con la introducción de un sistema de Linde de doble columna, en el cual existen dos columnas de rectificación y se coloca una en la parte superior de la otra. En este sistema, el aire líquido se introduce en un punto intermedio B a lo largo de la columna inferior, y un condensador-evaporador en la parte superior de esta columna se establece como una columna de destilación con reflujo que libere casi todo el oxígeno puro en el punto E. Para que la columna libere de manera simultánea el oxígeno puro, el oxígeno líquido rico (con aproximadamente el 45% de pureza) obtenido desde el fondo se introduce en el punto C intermedio en la columna superior. El reflujo y la rectificación en la columna superior producen oxígeno puro en el fondo y nitrógeno puro en la parte superior, además de que la mayor parte de las impurezas se eliminan primero de la columna.

En la columna superior se produce nitrógeno más que suficiente para las necesidades de reflujo. Como el condensador debe condensar vapor de nitrógeno por evaporación de oxígeno líquido, es necesario operar la columna inferior a gran presión, aproximadamente 500 kPa mientras que la columna superior es operada a una presión aproximada de 100 kPa. Este objetivo se logra con válvulas de regulación que ayuden a reducirla presión de los fluidos de la columna inferior cuando van a ser admitidos en la columna superior.

En el circuito mostrado en la figura 39, el nitrógeno y el oxígeno gaseoso se extraen a temperatura ambiente. El oxígeno líquido podría extraerse en el punto A y el nitrógeno

líquido en el punto E, pero en este caso se requeriría mayor cantidad de refrigerante. Aun las plantas de separación de aire a bajas temperaturas más modernas tienen una eficiencia cuyo valor es sólo una fracción pequeña del mínimo teórico, entre el 15 y el 20 %.

Las principales fuentes de la baja eficiencia son tres:

- La no idealidad de los procesos refrigerantes
- La imperfección de los intercambiadores de calor
- Las pérdidas de refrigeración mediante las fugas de calor

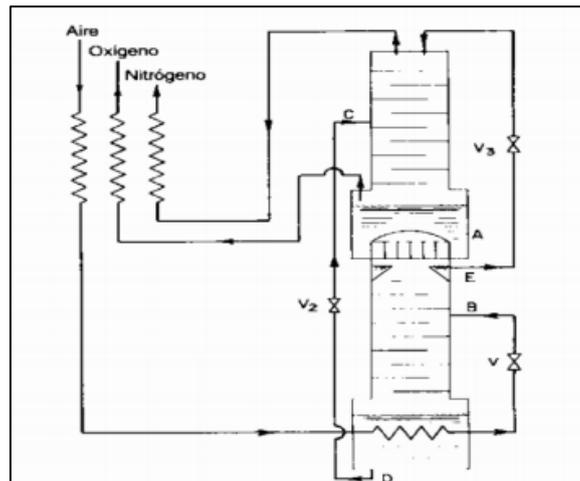


Figura 40: Columna de Linde Doble para Separación de Aire

2.20 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE FLUIDOS CRIOGÉNICOS

Según Perry (1998). Los recipientes de almacenamiento van desde los condensadores de bajo rendimiento aislados con espuma rígida o algún aislamiento fibroso, donde el líquido en el contenedor llega al punto de ebullición en pocas horas hasta los contenedores de alto rendimiento que tienen aislamiento en capas múltiples, en los que sólo se evapora menos del 0,1% del fluido contenido por día. En las unidades más eficientes, los contenedores de almacenamiento consisten en un recipiente interno que encierra el fluido criogénico que se almacena, y otro externo o chaqueta de vacío. En este último es necesario el vacío para que el almacenamiento sea adecuado y sirva al mismo tiempo como una barrera de vapor para la migración del vapor de agua y otros condensables en la superficie fría del recipiente interno.

Las fugas de calor tienen lugar en estos sistemas de almacenamiento de dos formas, por radiación y conducción a través del aislamiento, y por conducción a través de los soportes de la coraza interna, tubería, instrumentación y puertos o lugares de acceso. Las pérdidas por conducción se reducen al introducir largas trayectorias de fuga de

calor, mediante la formación de secciones transversales para tener bajos flujos de calor y utilizando materiales de baja conductividad térmica. Las pérdidas por radiación son el factor de fuga más importante a través de los aislamientos, pero pueden reducirse mediante el empleo de corazas de radiación, como aislamiento en capa múltiple, coraza para condensación de vapor frío y aislamiento en forma de polvo.

Se deben considerar diversos aspectos al diseñar el recipiente; los materiales de construcción deben ser compatibles con la sustancia criogénica almacenada. Se aceptan recipientes de acero al níquel al 9% para fluidos criogénicos de alto punto de ebullición (-196 °C), mientras que muchas aleaciones de aluminio y aceros son considerados estructuralmente aceptables para cualquier temperatura criogénica. Como el aluminio posee alta conductividad térmica, no es un material recomendado para tuberías y soportes que deben cruzar el espacio de aislamiento.

La mayor parte de los contenedores para fluidos criogénicos se diseñan con un volumen de merma de 10%, con lo que se permite una vaporización razonable de los contenedores debido al ingreso de calor, sin que se incurra en un descenso rápido de la presión en el contenedor.

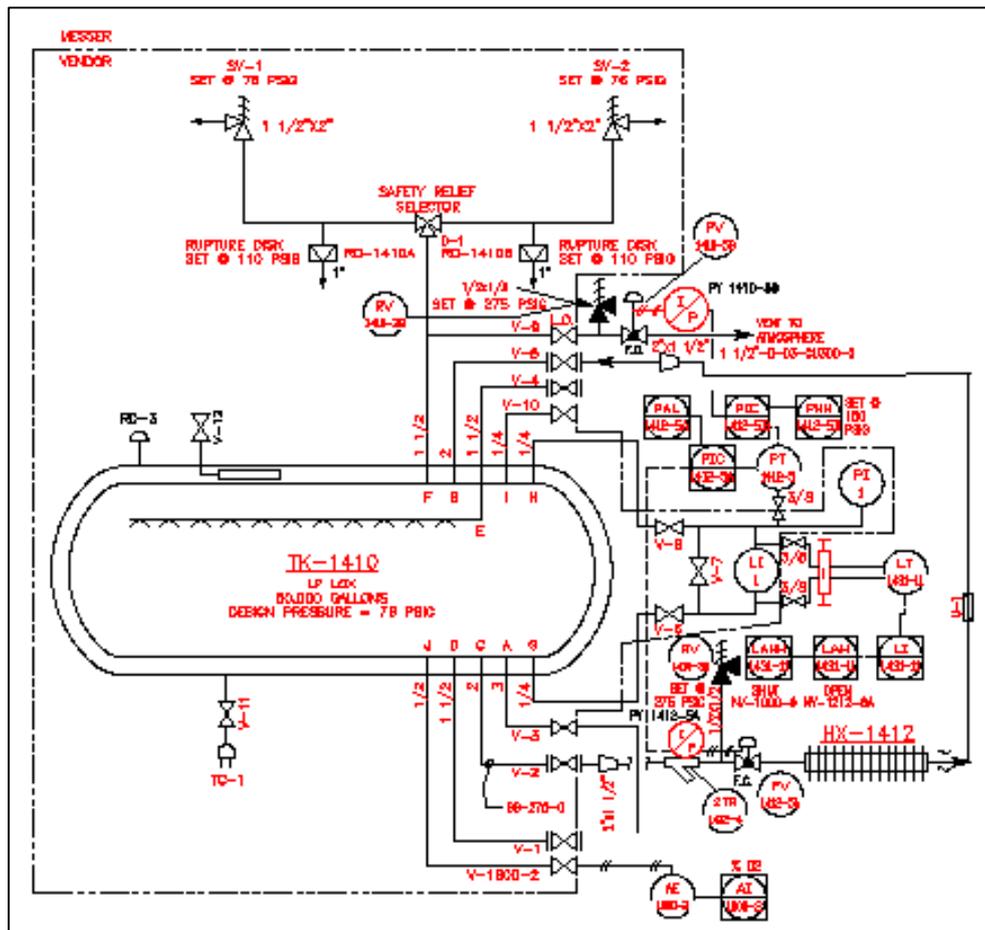


Figura 41: Sistema de Almacenamiento de Fluidos Criogénicos

2.21 AISLAMIENTO TÉRMICO

Según Perry (1998). La eficiencia de un sistema de licuefacción o refrigeración depende en gran medida de las fugas de calor que tienen lugar en el sistema. Como la eliminación de calor llega a ser muy costosa con la reducción de la temperatura, la mayor parte de los sistemas criogénicos utilizan alguna forma de aislamiento para minimizar este efecto.

El calor puede fluir a través del aislamiento a causa de la acción simultánea de diversos sistemas, entre los que se encuentran la conducción de sólidos, conducción de gases y radiación. Estos fenómenos se presentan de manera simultánea e interactúan además uno con otro, por lo que es práctica común emplear la propiedad de la conductividad térmica para caracterizar el aislamiento. Estos aislamientos criogénicos, se dividen en cuatro categorías: al vacío, de capa múltiple, con polvo y con espuma.

2.21.1 Aislamiento al Vacío

Según Perry (1998). El transporte de calor a través de un espacio evacuado (donde la presión es de 0,13 MPa o un poco mayor) se efectúa por radiación y conducción a través del gas residual, donde la transferencia de calor por radiación es el tipo predominante en esta categoría. Cuando se tiene conducción gaseosa normal con conductividad térmica constante, existe un gradiente lineal de temperatura en el espacio entre las superficies caliente y fría. Sin embargo, cuando la trayectoria libre media de las moléculas del gas llega a ser grande en relación con la distancia existente entre las dos superficies cuando se reduce la presión en un espacio evacuado, se puede obtener la conducción molecular libre. A fin de que tenga lugar la conducción molecular libre, la trayectoria libre media debe compararse con la distancia entre las dos superficies.

El transporte de calor por radiación se puede reducir de manera eficaz con la inserción de corazas flotantes que tienen superficies de baja emisividad en el espacio evacuado. Una coraza de baja emisividad puede reducir la transferencia de calor hasta la mitad del valor que se tiene sin coraza; dos corazas reducen este valor a la cuarta parte, y así sucesivamente.

2.21.2 Aislamiento de Capa Múltiple

Según Perry (1998). El aislamiento de capa múltiple, consiste en capas alternadas de material con alta reflectividad, como hojas de aluminio o aluminizado y materiales espaciadores o aislantes de baja conductividad, como fibra de vidrio, vidrio tejido, nylon, todos al alto vacío. Es probable que la baja conductividad térmica de los aislamientos de capa múltiple pueda atribuirse al hecho de que todos los mecanismos de transferencia de calor (convectivo, conductivo y radiactivo) se vean reducidos a un mínimo.

Como la transferencia de calor por radiación es inversamente proporcional al número de corazas intermedias reflejantes y directamente proporcional a la emisividad de las corazas, esta radiación se minimiza utilizando muchas corazas o capas de materiales con baja emisividad. La convección se elimina al disminuir la presión hasta un valor en que la trayectoria libre media de las moléculas del gas sea tan grande como el espaciamiento entre las capas de aislamiento. La transferencia de calor a través del material espaciador es directamente proporcional a la conductividad térmica del material que se utilice e inversamente proporcional a la resistencia al flujo de calor en los puntos de contacto entre los espaciadores y la coraza; la baja conductividad, las dimensiones, la geometría y la naturaleza discontinua de los materiales seleccionados para estos espaciadores, contribuye a reducir la conducción en sólido hasta un valor mínimo.

2.21.3 Aislamiento con Polvo

Según Perry (1998). Un método empleado para lograr algunos de los beneficios de corazas flotantes múltiples, sin incurrir en las dificultades de las delicadas complicaciones estructurales, se logra utilizando aislamientos en forma de polvo. La falla que se tiene al emplear un aislamiento con estas características es la reducción de la eficiencia térmica total del sistema de aislamiento, respecto a la que se obtendría con aislamiento de capa múltiple.

El sistema de aislamiento con polvo consiste en un material compuesto de partículas finamente divididas, como perlititas, dióxido de sílice expandido, silicato de calcio, tierra diatomácea, carbón negro, que se coloca como empaque entre las superficies que se van aislar. Cuando la presión del gas es del orden de 0,1 MPa (por lo general con un inerte), el polvo reduce la transferencia de calor por convección y radiación, y cuando el tamaño de la partícula es suficientemente pequeño, también reduce la trayectoria libre media de las moléculas del gas. Cuando el polvo se evacua a presiones entre 1,33 y 0,133 Pa, la conducción del gas llega a ser muy pequeña y la transferencia de calor se efectúa de manera principal por radiación y conducción de sólidos.

2.21.4 Aislamiento con Espuma

Como las espumas no son materiales homogéneos, su conductividad térmica aparente depende de la densidad del material, el gas utilizado, la formación de la espuma y la temperatura media del aislamiento. La conducción de calor a través de este aislante se determina por la convección y radiación en las celdas (poros), y en la estructura sólida la evacuación de una espuma eficaz para la reducción de la conductividad térmica, indica que se tiene una estructura celular parcialmente abierta, pero los valores obtenidos serán parcialmente mayores que en los aislamientos con capa múltiple o polvo. El efecto opuesto, la difusión de gases atmosféricos en las celdas, puede ocasionar un incremento en la

conductividad térmica aparente; Esto se hace más significativo para la difusión de hidrógeno y helio en las celdas.

La mayor desventaja de la espumas no es que su conductividad térmica sea relativamente alta cuando se compara con otros aislantes, sino su rendimiento térmico muy bajo. Cuando se aplica a sistemas térmicos, tienden a agrietarse cuando es sometida a ciclos térmicos constantes y pierde su valor de aislamiento.

2.22 PRINCIPIO DE LAS PLANTAS SEPARADORAS DE AIRE

Según Migoya (2003). La base de este proceso es la separación del aire licuado en sus componentes, aprovechando las diferentes temperaturas de condensación de los mismos. Así una planta de fraccionamiento de aire debe disponer de los siguientes dispositivos para poder cumplir con el proceso:

2.22.1 Compresión de Aire

Según Migoya (2003). El aire atmosférico necesario para la licuación es succionado a través de un filtro por un compresor de aire multietapas y comprimido a la presión correspondiente al proceso. El calor de compresión es eliminado a través de varios intercambiadores de calor dispuestos en serie.

2.22.2 Enfriamiento del Aire de Proceso

Según Migoya (2003). El aire comprimido es enviado a una serie de lavadores de gas (scrubber), con el propósito de eliminar las impurezas sólidas suspendidas y bajar su temperatura antes de ser enviado al sistema de purificación.

2.22.3 Sistema de Purificación del Aire

Según Migoya (2003). El aire enfriado es enviado a un sistema de purificación (tamices moleculares). Estos equipos contienen en su interior un lecho de material adsorbente en el que se atrapan o adsorben por medio de adsorción física todas las impurezas contenidas en el aire las cuales son indeseables para el proceso.

2.22.4 Enfriamiento del Aire a La Temperatura de Licuación

Según Migoya (2003). El aire limpio y seco es enviado a una serie de intercambiadores de calor reversibles. En estos equipos se enfría el aire hasta la temperatura de licuación, aprovechando el intercambio de calor entre los productos gaseosos y el nitrógeno de desecho que se obtienen de las columnas de destilación.

2.22.5 Producción de Frío

Según Migoya (2003). La constante necesidad de frío para la instalación, causada por la pérdida de aislamiento, pérdidas en intercambio térmico y toma de líquidos de la parte de baja temperaturas, se cubre mediante expansión de aire en las turbinas y por estrangulamiento en válvulas. Es necesaria la producción de frío según la necesidad de productos líquidos.

2.22.6 Licuación

Según Migoya (2003). La licuación tiene lugar en los condensadores, en los cuales se da un intercambio térmico entre el gas nitrógeno y oxígeno líquido. Por las distintas presiones a las que están sometidos estos medios, se licua por un lado nitrógeno mientras que por el otro se vaporiza oxígeno líquido. Ambos componentes son conducidos a las respectivas columnas directamente conectadas. Allí son empleados como líquido de reflujo para el mantenimiento correcto de la rectificación y extraídos como productos líquidos.

2.22.7 Fraccionamiento del Aire (Rectificación)

Según Migoya (2003). En la columna de alta presión tiene lugar un fraccionamiento preliminar del aire en un líquido rico en oxígeno y en nitrógeno. El líquido con elevada proporción de oxígeno es conducido desde el fondo de la columna de alta presión hasta la columna de baja presión. Una parte del nitrógeno líquido del fondo de la columna de alta presión es introducida por la parte superior de la columna de baja presión. En la columna de baja presión tiene lugar el fraccionamiento final del aire. Los productos O₂ de la parte inferior y el N₂ de desecho de la cabeza de la columna de baja presión se calientan hasta la temperatura ambiente al ingresar a los distintos intercambiadores térmicos, igualmente con el N₂ puro el cual se obtiene de la cabeza de la columna de alta presión.

2.23 EL AIRE

Gases Industriales del Este, 2010. El aire es una mezcla de gases sin olor ni sabor, que permanecen alrededor de la Tierra formando la atmósfera por la acción de la fuerza de gravedad. El aire es esencial para la vida en el planeta y dentro de su composición destacan como elementos más abundantes el nitrógeno, el oxígeno y el argón, y formando parte del mismo en menor proporción se encuentran otros gases tales como dióxido de carbono, hidrógeno, helio, neón, criptón y xenón. Además de estos constituyentes fijos, cuya proporción permanece prácticamente constante en las capas bajas de la atmósfera, contiene el aire otros gases como vapor de agua, ozono, hidruros volátiles y productos de combustión.

La composición del aire permanece constante por lo menos en los primeros 100 km más bajos de la atmósfera. Se han realizado determinaciones de estas proporciones mediante espectrómetros de masa incorporados a cohetes que lo han demostrado. Esta constancia de composición debe atribuirse a fenómenos de convección y turbulencia, sin embargo esto no implica que represente un estado de equilibrio sino más bien un estado estacionario, en el que una serie de procesos cíclicos liberan los componentes fundamentales a la misma velocidad que son consumidos como consecuencia de otras reacciones químicas en las que participan.

COMPONENTE	SIMBOLO QUIMICO	COMPOSICIÓN
Nitrógeno	N	78.03 %
Oxígeno	O	20.99 %
Argón	Ar	0.93 %
Dióxido de Carbono	CO ₂	0.03 %
Hidrogeno	H	0.01 %
Neón	Ne	0.00123 %
Metano	CH ₄	0.0002 %
Helio	He	0.0004 %
Criptón	Kr	0.00005 %
Xenón	Xe	0.000006 %
Vapor de Agua	H ₂ O	Variable
Ozono	O ₃	Variable
Óxido Nitroso	N ₂ O	Variable

Tabla 2: Principales Componentes del Aire

2.23.1 Propiedades físicas del aire

Gases Industriales del Este, 2010. El aire tiene un comportamiento que es característico del estado gaseoso; posee masa y tiene la facultad de llenar de manera uniforme el espacio que lo contiene. Adicionalmente, el aire es de baja densidad, aproximadamente de 0,001293 g/cm y además tiene la propiedad de ser un buen aislante térmico y ecléctico. Asimismo, este gas tiene la particularidad de expandirse y contraerse debido a los diferentes factores que permiten que las moléculas se separen o se unan. Por ejemplo, a mayor temperatura, mayor el movimiento y mayor su separación, y a mayor presión externa, menor es el movimiento y menor es la distancia entre las partículas.

2.23.2 Propiedades Químicas del Aire

Gases Industriales del Este, 2010. Las propiedades químicas del aire son análogas a las de sus componentes, dotados de impedimentos cinéticos que los hacen relativamente inertes en condiciones normales de temperatura. Así, aun cuando son posibles un gran número de reacciones de oxidación por el oxígeno del aire en disolución, son relativamente

pocas las que se producen rápidamente. A temperaturas elevadas las reacciones del aire son debidas al oxígeno. El nitrógeno, mucho más inerte aún, no hace más que atenuar el vigor de las reacciones del oxígeno. Otra propiedad significativa que cabe recalcar es la psicrometría, que desde la perspectiva de la termodinámica es la capacidad que tiene el aire de captar y retener cargas de agua.

2.23.3 Aplicaciones de los Gases del Aire

Gases Industriales del Este, 2010. Con independencia de su papel trascendental en los procesos biológicos (respiración), los gases del aire constituyen materias primas fundamentales en la industria química. La síntesis de fertilizantes nitrogenados y en particular del amoníaco fue el proceso que constituyó el estímulo inicial para la separación de los componentes del aire en gran escala. Inicialmente el nitrógeno fue el objeto fundamental de la separación, debido a que la distribución y transporte del oxígeno resultaba costosa y muchos de los procesos para los cuales era necesario este componente se podían realizar con aire. Pero con el paso del tiempo en los países industrializados, se ha producido una enorme expansión en la utilización de oxígeno y de otros componentes del aire como el argón, lo cual ha llevado a la puesta en funcionamiento de nuevas instalaciones que permitan separar estos gases y así satisfacer las necesidades de las diferentes industrias debido a su diversidad de aplicaciones:

- Ciencia, investigación nuclear, farmacéutica y salud.
- Industria textil, del papel, goma y plástico.
- Industria de la alimentación, ganadera y agropecuaria.
- Industria química, petroquímica y del petróleo.
- Industria de la construcción, vidrio y esmalte.
- Protección ambiental, conservación de lagos y ríos, y tratamiento de aguas negras.
- Industria siderúrgica, metalúrgica, aluminio y automotriz.
- Distribución electrotécnica, electrónica y comunicaciones.
- Militar, armamentos aeronavales, astilleros, protección industrial

2.24 OXÍGENO

Gases Industriales del Este, 2010. El oxígeno es un gas a temperatura y presión ambiental; bajo estas condiciones presenta formula molecular O_2 . Es ligeramente magnético, incoloro, inodoro, insípido, comburente y reacciona fácilmente con materiales orgánicos y metálicos. Existe en otras dos formas moleculares, una formada por tres átomos de oxígeno, O_3 , denominada ozono, y otra formada por cuatro átomos por molécula, O_4 , ésta última se descompone fácilmente en oxígeno ordinario.

Es uno de los elementos más importantes de la química y participa de forma muy importante en el ciclo energético de los seres vivos, esencial en la respiración celular de los organismos aeróbicos y en los procesos de combustión. En su forma triatómica, (ozono) desempeña un rol importante protegiendo a la Tierra de la incidencia de la radiación ultravioleta procedente del sol.

El oxígeno es el elemento más abundante en la Tierra, siendo éste el que predomina en la corteza terrestre, donde se encuentra como componente de la mayoría de las rocas y minerales (un 46,7% estimado), en los océanos (en torno al 87% como componente del agua) y el segundo en la atmósfera (cerca del 21%), además representa un 60% del cuerpo humano.

En su estado líquido y sólido, este elemento tiene una ligera coloración azulada; reacciona con prácticamente todos los metales, provocando la corrosión, forma compuestos llamados óxidos con casi todos los elementos.

En la combustión espontánea, el calor desarrollado por la reacción de oxidación es suficientemente grande para elevar la temperatura de la sustancia hasta el punto de producir llamas; por ejemplo, el fósforo se combina tan vigorosamente con el oxígeno, que el calor liberado en la reacción hace que el fósforo se funda y arda.

Los métodos industriales más importantes para la obtención de oxígeno son la electrólisis del agua y la destilación fraccionada de aire líquido. En este último método se licua el aire y se deja evaporar el nitrógeno, ya que es más volátil y se vaporiza primero quedando el oxígeno en estado líquido.

PROPIEDAD	UNIDADES U.S	UNIDADES S.I
Formula Molecular	O ₂	O ₂
Peso Molecular	31.9988	31.9988
Punto de Fusión (1 atm)	-362 °F	-219 °C
Calor Latente de Fusión	5.96 Btu/lb	13.9 kJ/kg
Densidad del Liquido	71.23 lb/pie ³	1141 kg/m ³
Punto de Ebullición (1 atm)	-297 °F	-183 °C
Calor Latente de Vaporización	91.7 Btu/lb	13.86 kJ/kg
Temperatura Critica	-181.43 °F	-118 °C
Presión Critica	731.4 psig	5043 kPa (abs)
Densidad Critica	27.22 lb/pie ³	436.1 kg/m ³
Temperatura del Punto Triple	-361.8 °F	-218.8 °C
Presión del Punto Triple	0.022 psi	0.1480 kPa
Densidad del Gas	0.279 lb/pie ³	4.475 kg/m ³
Densidad del Gas(1atm, 21 °C)	0.084 lb/pie ³	1.326 kg/m ³
Factor de Comprensibilidad	0.9994	0.9994
Gravedad Especifica	1.105	1.105
Volumen Esp.(1atm, 21°C)	12.08 pie ³ /lb	0.7541 m ³ /kg
Capacidad Calorífica a Presión	0.2197 Btu/lb°F	0.9191 kJ/kg
Capacidad Calori. a Volumen	0.1572 Btu/lb°F	0.6578 kJ/kg
Viscosidad (1atm, 0 °C)	0.0000128	0.0001909
Conductividad Tér.(1atm, 0 °C)	0.014	0.0242 W/m.K

Tabla 3: Propiedades Físicas del Oxígeno

2.24.1 Aplicaciones del Oxígeno a Nivel Industrial

Air Liquide, 2009. En la industria metalúrgica el oxígeno es utilizado en el área de tratamiento del metal en soldaduras oxicorte, en la fabricación de acero líquido (acerías) como comburente para crear lanzas de oxígeno que aumentan la energía química en los hornos de fundición (hornos de arco eléctrico). Además, es utilizado en el área de reducción directa, donde las pellas (Fe_2O_3) se convierten en hierro metálico al ponerse en contacto con un medio reductor, compuesto por una mezcla de gas natural y oxígeno.

En la industria química y petrolera, este elemento es utilizado para mejorar el rendimiento de un amplio número de procesos, como la producción de gasolina, metanol y amoníaco, y para enriquecer la regeneración del aire en unidades de craqueo catalítico de fluidos. Además es empleado en reacciones químicas de oxidación como la producción de óxido de etileno, óxido de propileno, acetato de vinilo, sulfato férrico, etc.

En la industria de alimentos y bebidas, es usado en la piscicultura, en la aceleración de procesos de fermentación y en la creación de atmósferas modificadas para el envasado de carnes.

En la industria de pulpa y papel, el oxígeno es utilizado para el blanqueo ecológico de la pasta de papel, es aplicado principalmente en la etapa de dignificación. Interviene también en la producción y combustión de licores de polisulfuros (hornos de calentamiento, dosificación de calderas) y en el tratamiento de los efluentes como precursor de ozono.

En el área de la ciencia y la medicina, el oxígeno es empleado en ensayos y calibraciones, como medio de oxidación detector de ionización y como suplemento en pacientes con dificultades respiratorias.

En las industrias del vidrio y del cemento, es empleado principalmente para la fundición del vidrio y en general para todo proceso de oxicomustión.

En la industria electrónica, el oxígeno puro es usado para la oxidación activa de ciertos materiales tales como el silicio o dióxido de silicio y para la fabricación de ozono en la oxidación o limpieza.

En el área del espacio y aeronáutica, el oxígeno es empleado en forma líquida en una mezcla combustible utilizada para la propulsión de etapas criogénicas de cohetes.

En la protección ambiental, el oxígeno es utilizado para incrementar el tratamiento de los efluentes de agua (DBO, barro, olores, energía), mejora el tratamiento del agua minimizando los barros generados y actúa en la purificación del agua potable.

2.24.2 Efectos Fisiológicos del Oxígeno

Gases Industriales del Este, 2010. El oxígeno no es tóxico bajo la mayoría de las condiciones de uso y es necesario para mantener la vida en el planeta, pero en estado líquido o gaseoso a bajas temperaturas, congelaría los tejidos y ocasionaría quemaduras criogénicas severas, y como ozono es altamente perjudicial por su acción irritante. Aunque

este elemento sólo no es inflamable, sí es un excelente comburente y reacciona violentamente con materias combustibles y puede causar fuego y explosiones.

La inhalación de este gas en altas concentraciones (mayores de 75%) causa síntomas de hiperoxia que incluyen náuseas, mareos, dolor de garganta, hipotermia, problemas respiratorios, dolor en el pecho, pérdida de la visión, y en algunos casos afecta el sistema nervioso causando contorsiones musculares, pérdida del conocimiento y convulsiones, capaces de conducir a la muerte.

2.24.3 Almacenamiento del oxígeno

Nitrox C.A., 2007. El oxígeno gaseoso se envasa en cilindros de alta presión y en estado líquido en tanques o termos criogénicos a la presión permisible de acuerdo al diseño del recipiente.

Estos contenedores, ya sea de líquido o de gas, deben ser ubicados en espacios frescos y ventilados, lejos de áreas congestionadas y salidas de emergencia. Asimismo, deben estar separados de materiales combustibles e inflamables por una distancia mínima de 6 metros. Además se deben prevenir ataques químicos o daños mecánicos como cortes o abrasión sobre la superficie de los contenedores y evitar que los mismos entren en contacto con algún sistema energizado eléctricamente

2.24.4 Manipulación del oxígeno

- Evitar el contacto del oxígeno líquido o sus vapores fríos con la piel.
- El oxígeno debe ser manejado en áreas ventiladas.
- Prevenir que líquidos de oxígeno queden atrapados en sistemas cerrados.
- Las válvulas de oxígeno deben ser abiertas lentamente, ya que el producto gaseoso se encuentra a altas presiones.
- Es esencial la limpieza y la compatibilidad de los materiales en contacto con oxígeno.
- No forzar las válvulas de oxígeno ni introducir objetos en los orificios de la misma, ya que se podrían causar daños y provocar fuga del producto.
- Los cilindros de oxígeno deben ser manipulados con cuidado, evitando arrastrar o golpear el cuerpo de los mismos o la válvula.
- Utilizar una válvula de control o de retención para evitar riesgos de retroceso de flujo al interior del contenedor.
- Usar un regulador para reducir la presión, cuando se vaya a emplear el producto en un sistema de menor presión (AGA, 2005)

2.25 TRANSFERENCIA DE CALOR

Según Holman, (1998). Se basa en el principio de la conservación de la energía, la cual establece que cuando un cuerpo se deja en un medio que tiene una temperatura diferente, la transferencia de energía sucede entre el cuerpo y los alrededores hasta que se establece el equilibrio térmico; es decir, el cuerpo y los alrededores alcanzan la misma temperatura. La dirección de la transferencia de energía siempre es del cuerpo de mayor temperatura al de temperatura más baja. El calor se transfiere, generalmente, por conducción, convección o radiación.

La ciencia de la transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor. Esta ciencia pretende no sólo explicar cómo la energía térmica puede ser transferida, sino también predecir la rapidez con la que, bajo ciertas condiciones específicas, tendrá lugar esa transferencia.

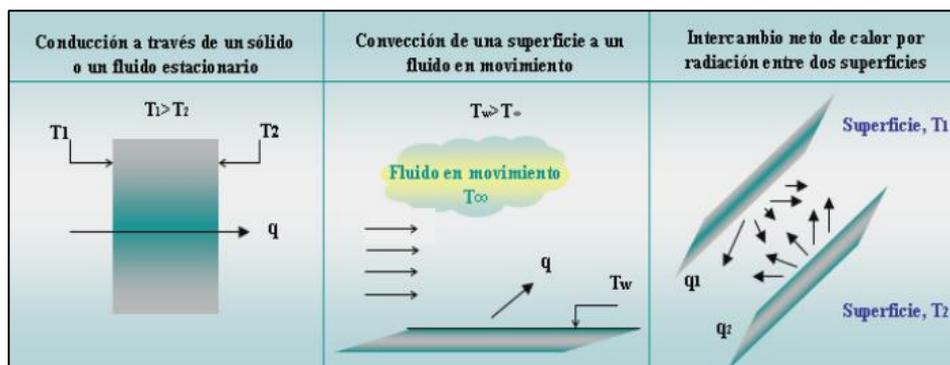


Figura 42: Modos de Transferencia de Calor

2.25.1 Conducción

Según Holman, (1998). Por este mecanismo, el calor puede ser conducido a través de sólidos, líquidos y gases. La conducción se verifica mediante la transferencia de energía cinética entre moléculas adyacentes. En un gas las moléculas “más calientes”, que tienen más energía y movimiento, se encargan de impartir energía a moléculas colindantes que están a niveles energéticos más bajos.

Este tipo de transferencia siempre está presente, en mayor o menor grado, en sólidos, líquidos y gases en los que existe un gradiente de temperatura. En la conducción la energía también se transfiere por medio de electrones “libres”, un proceso muy importante en los sólidos metálicos. Entre los ejemplos en los que la transferencia se verifica ante todo por conducción, se cuentan la transferencia a través de paredes o intercambiadores de una nevera, el tratamiento térmico en el forjado de acero, la congelación del suelo durante el invierno, etc.

Según Geankoplis, (1998). Los fundamentos de la conducción de calor se establecieron hace más de un siglo y se atribuyen generalmente a Fourier. La ley de Fourier de la conducción del calor, establece que la densidad de flujo de calor por conducción es proporcional al gradiente de temperatura y se representa mediante la ecuación 2.1.

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

q: flujo de calor por unidad de área o densidad de flujo de calor (W/m²).

k: conductividad térmica del sólido conductor (W/m .K).

dT: diferencial de temperatura (K).

dx: longitud del sólido conductor (m).

2.25.2 Convección

Según Cao, (2004). La convección es un mecanismo de transferencia de calor que ocurre en una interfase sólido fluido, en donde el fluido actúa como vehículo para el transporte de energía, y la densidad de flujo de calor depende de la velocidad con que se renueva el fluido sobre la superficie del sólido.

Normalmente se distinguen dos tipos de movimiento de fluido: laminar y turbulento. En régimen laminar, las líneas de corriente del fluido siguen trayectorias estables, de modo que al alcanzarse el estado estacionario la velocidad en cada punto es constante. En cambio, en el régimen turbulento, si bien se habla de un estado estacionario, donde cada punto del fluido puede caracterizarse por una velocidad media, existen fluctuaciones completamente aleatorias de velocidad alrededor de este valor medio (Cao, 2004).

Según Holman, (1998). Existen dos tipos de convección: natural y forzada. La diferencia entre ambas radica en que en la forzada se provoca el flujo de un fluido sobre una superficie sólida por medio de una bomba, un ventilador, u otro dispositivo mecánico, y en la convección libreo natural, un fluido más caliente o más frío que está en contacto con la superficie sólida causa una circulación debido a la diferencia de densidades que resulta del gradiente de temperaturas en el fluido.

Según Incropera, (1999). Sin embargo, sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación o modelo apropiado es de la forma:

$$q = h(T_W - T_\infty) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

q: flujo de calor por convección (W/m²)

h: coeficiente convectivo de transferencia de calor (W/m².K)

T_w: temperatura de la superficie (K)

T[∞]: temperatura del fluido (K)

La ecuación 2.2 se conoce como la ley de enfriamiento de Newton, y la constante de proporcionalidad h se denomina coeficiente de transferencia de calor por convección, el cual depende de las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de transporte

2.25.3 Radiación

Según Perry, (1998). Este mecanismo no depende de algún medio de transferencia y puede efectuarse a través del vacío absoluto. La rapidez a la que se emite energía radiante desde un cuerpo, es directamente proporcional a la amplitud de oscilación de sus moléculas; como el movimiento molecular u oscilación aumenta al elevarse la temperatura, la radiación del cuerpo se incrementará al elevarse la temperatura del mismo.

2.26 IMPORTANCIA DE LOS PROGRAMAS DE INGENIERÍA EN LA INDUSTRIA

El desarrollo de estos proyectos de Ingeniería constituyen una tarea multidisciplinaria a través de la colaboración de grupos de ingenieros con experiencia y conocimiento relacionados con el área de estudio, para llevar a cabo las distintas etapas que integran el desarrollo de un proyecto, tales como: la Ingeniería Conceptual, Ingeniería Básica, Ingeniería de Detalle e Ingeniería de Construcción.

El dimensionamiento de equipos y tuberías forma parte integral en el desarrollo de esta etapa y corresponde una técnica muy familiar para la mayoría de los ingenieros, debido a su relación con los conocimientos básicos que han adquirido a través de su formación profesional en sus distintas asignaturas, como flujo de fluidos, diseño de procesos, ingeniería de proyectos, entre otros, el cual les ha brindado los recursos necesarios para llevar a cabo los procedimientos de Ingeniería que habitualmente se ejecutan durante un proyecto para efectuarlos de manera práctica, metódica y ordenada.

2.27 FLUIDOS INCOMPRESIBLES EN LA INDUSTRIA

Los líquidos juegan un papel muy importante en la industria, pues constituyen la mayor parte del transporte en tuberías en relación a los gases o vapores, su transporte por

medio de bombas a través de las líneas de procesos o de servicios auxiliares es parte fundamental para la operación dentro de una planta, ya sea para su recirculación o alimentación a los equipos de procesos. En las líneas de procesos se transportan generalmente productos terminados, tales como: gasolina, líquidos criogénicos, diesel, entre otros.

2.27.1 Oxígeno en Estado Líquido

El oxígeno líquido (LOX), es un gas comburente por excelencia; a niveles de temperatura criogénica es uno de los componentes principales utilizados en la investigación espacial. Se lo utiliza profusamente en los procesos de combustión, en los cuales se requiere alcanzar temperaturas de llama considerables de manera eficiente.

En las líneas de servicios se transporta el oxígeno líquido, donde es llevada a los contenedores móviles para una función final.

2.27.2 Agua de Proceso

El agua en el proceso es utilizada como reactivo, disolvente o como agente de enfriamiento de contacto directo. El suministro típico de agua para las distintas plantas de proceso suele ser dividido en líneas de servicio como: agua de enfriamiento, agua para alimentación a calderas, agua para uso sanitario, red contraincendios y agua para múltiples servicios. Normalmente, para este servicio se requiere agua de gran pureza, con el fin de evitar cualquier tipo de contaminación. En estos casos se utiliza agua tratada y desmineralizada o condensada sin contaminar. La presión de este sistema depende de la presión del proceso.

2.27.3 Agua de Servicio

Según Howard, (1976). El agua de servicios es utilizada para la limpieza en áreas, equipos, ensayos de equipos y servicios de mantenimiento, donde el agua proviene generalmente de alguna fuente natural como ríos, pozos, etc., o parte del agua tratada proveniente del tratamiento de agua del servicio sanitario. La presión de este sistema generalmente se encuentra de 30 psig a 40 psig.

2.27.4 Combustibles Líquidos

Los combustibles líquidos constituyen un servicio auxiliar dentro de las plantas de proceso. Son generalmente aceites combustibles o productos de desecho a base de hidrocarburos. Se utiliza un sistema de circulación para distribuir el combustible desde los tanques de almacenamiento a los puntos de utilización y cuando se necesita calentar el combustible

con el fin de reducir su viscosidad, las líneas para su conducción deben ser trazadas con vapor, con sus correspondientes trampas de vapor.

2.27.5 Propiedades Físicas

Según Mott, (1996). Es común que las propiedades de los líquidos durante su transporte suelen ser considerados como constantes, en especial cuando las tuberías son de longitud prolongada o se encuentran cubiertas por un aislante térmico. Aquí la transferencia de calor es casi despreciable, y el comportamiento se torna uniforme a un determinado tiempo de respuesta muy corta. Para cuestiones prácticas de ingeniería es común considerar este comportamiento con el fin de utilizar métodos de cálculos más convencionales. Sin embargo, cuando las condiciones cambian de una forma considerable el análisis de los problemas requieren de situaciones un tanto complejas para su resolución (Darby, 2001), (Mott, 1996).

El oxígeno líquido tiene un color azul pálido y es fuertemente paramagnético; puede ser suspendido entre los polos de un potente imán de herradura. El oxígeno líquido tiene una densidad de 1,141 g/cm³ (1,141 kg / L) y es criogénico con un punto de congelación de 50,5 K (-368,77 ° C , -222,65 ° C) y un punto de ebullición de 90,19 K (-297,33 ° C , -182,96 ° C) a 101,325 kPa (760 mmHg). El oxígeno líquido tiene una relación de expansión de 1:861 bajo 1 atmósfera estándar (100 kPa) y 20 ° C (68 ° F) , [2] [3] y debido a esto, se utiliza en algunos aviones comerciales y militares como fuente de oxígeno para respirar.

Debido a su naturaleza criogénica, el oxígeno líquido puede causar que los materiales que toca se vuelvan extremadamente frágiles. El oxígeno líquido es también un agente oxidante muy potente: materiales orgánicos se queman rápidamente y enérgicamente en oxígeno líquido. Además, si se remojan en oxígeno líquido, algunos materiales como ladrillos de carbón, negro de humo, etc, puede detonar impredecible de fuentes de ignición tales como llamas, chispas o el impacto de los golpes de luz. Petroquímicos, incluyendo asfalto, a menudo exhiben este comportamiento.

En la Tabla 05 se presenta el efecto de la temperatura sobre el comportamiento de las propiedades de los líquidos.

VARIABLE	DENSIDAD	GRAVEDAD ESPECIFICA	VISCOSIDAD	PRESIÓN DE VAPOR
Aumento de la temperatura	↓	↓	↓	↑
Disminución de la temperatura	↑	↑	↑	↓

(↑) Aumenta, (↓) Disminuye

Tabla 4: Dependencia de las Propiedades de los Líquidos Respecto a la Temperatura

2.27.5.1 Densidad

Según Sotelo, (1985). La densidad de un líquido se expresa generalmente como la masa por unidad de volumen a una determinada temperatura y varía de acuerdo con este cambio. A altas temperaturas los líquidos se tornan menos densos debido a que sus moléculas se mueven más rápido y se distancian unas de otras creando vacíos, lo que aumenta su volumen y consecuentemente disminuye su densidad. De manera contraria respecto en el oxígeno líquido al encontrarse a una temperatura relativamente baja su densidad será aún mayor. Sin embargo, durante el transporte generalmente se puede suponer con poco error que las densidades de los líquidos no varían con la temperatura si no se presentan cambios de fase, de igual forma los cambios de presión no causan efectos significativos en la densidad por tal motivo reciben el nombre de fluidos incompresibles.

2.27.5.2 Gravedad Específica

La gravedad específica es una medida relativa de la densidad, usualmente se conoce también como densidad relativa. Este valor representa la relación de la densidad de un líquido a una cierta temperatura de referencia (dependiendo de las condiciones de operación) con respecto a la densidad del agua a una temperatura estándar (15 °C ó 60 °F). Cuando la densidad del líquido está referenciado a la misma temperatura estándar del agua, la gravedad específica se define a las mismas condiciones, por ejemplo: gravedad específica 60 °F/60 °F (API, 1994).

$$sp. gr. = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \quad (Ec. 2.3)$$

Donde:

sp.gr. = gravedad específica del líquido, adimensional

ρ = densidad del fluido a la temperatura de operación, lbm/ft³

agua ρ = densidad del agua a condiciones estándar, 62.3662 lbm/ft³ (60 °F, 14.7 psia)

2.27.5.3 Porcentaje de Flujo de Sobrediseño

Según Swaffield, (1983). Cuando se dimensionan tuberías para el transporte de un fluido generalmente se emplean tuberías nuevas o tuberías existentes que presentan efectos de envejecimiento, es decir; el deterioro de su superficie interna debido a la agresividad del fluido y de las condiciones de servicio, tales como: la corrosión, erosión e incrustación. El uso de cualquiera de estas tuberías mostrará valores aleatorios en

su rugosidad conforme pase el tiempo, afectando indudablemente las condiciones del flujo, disminuyéndolo de manera significativa y aumentando la potencia necesaria de la bomba para mantener el flujo requerido.

Según Garaicochea, (1983). Para compensar este problema generalmente se considera durante los cálculos preliminares un porcentaje sobre la capacidad de diseño conocido también como porcentaje de flujo de sobrediseño, este porcentaje varía de un 10 % al 30 %, el cual garantiza un dimensionamiento conservador de la tubería. No obstante, el criterio de la experiencia juega un papel muy importante para definir también este valor.

$$W_r = W \cdot \left(\frac{\%SF}{100\%} \right) + W \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde:

W_r = flujo másico de sobrediseño, lbm/h

W = flujo másico del fluido, lbm/h

$\% SF$ = porcentaje de flujo de sobrediseño, %

2.27.6 Pérdidas de Energía

La mayoría de los problemas referentes al flujo de fluidos en tuberías implican la predicción de las condiciones en una sección del sistema. Es por ello que todas las fórmulas prácticas se derivan del teorema de Bernoulli, el cual es una expresión de la aplicación del principio de la conservación de la energía mecánica en una tubería, como se muestra en la Figura 1.1. Considera un balance de energía de un fluido incompresible no viscoso que fluye a través de un segmento de tubería de longitud recta y de diámetro constante.

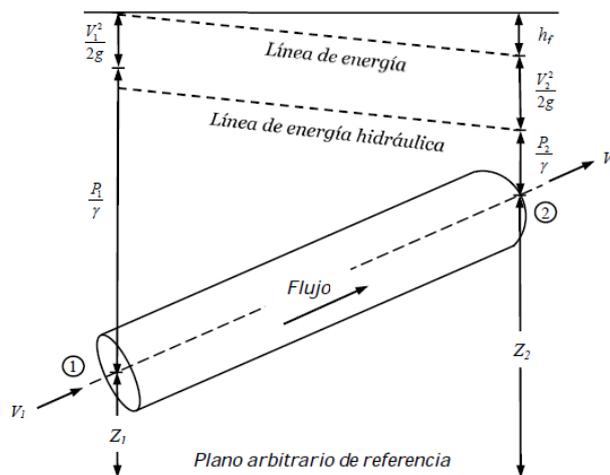


Figura 43: Balance de energía entre dos puntos en una tubería de longitud recta
Aplicando el balance de energía para una tubería, se tiene:

Flujo estacionario: velocidad del fluido constante respecto al tiempo.

$$\text{Energía en la entrada} - \text{Energía en la salida} = \text{Energía acumulada}^0$$

$$\text{Energía en la entrada} = \text{Energía en la salida}$$

$Q \approx 0$: No hay transferencia de calor hacia dentro o fuera de la tubería.

$$\text{Energía total en la entrada} + \text{Energía de calor}^0 = \text{Energía total en la salida} + \text{Energía total de trabajo}$$

Energía potencial de entrada	Energía cinética de entrada	Energía potencial de salida	Energía cinética de salida	Energía de trabajo de flujo
z_1	$\frac{V_1^2}{2g}$	z_2	$\frac{V_2^2}{2g}$	$\frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma}$

Reordenando se tiene finalmente la ecuación de Bernoulli, el cual relaciona la energía de presión, la energía potencial y la energía cinética de un fluido perfecto, y establece que la cantidad de energía total que posee un fluido en movimiento es constante a lo largo de la tubería:

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Considerando que la densidad del fluido permanece constante durante toda la trayectoria y aplicando la ecuación de continuidad en las dos secciones de la tubería se puede establecer que la rapidez del flujo también permanece constante en cualquier sección. Por lo tanto, la energía cinética permanece invariable y la pérdida de energía total en la ecuación de Bernoulli se manifiesta exclusivamente como una pérdida de presión.

$$\rho_1 = \rho_2$$

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot V_2$$

$$V_1 = V_2$$

(Ec. 2.6)

$$Z_1 - Z_2 = \frac{P_2 - P_1}{\gamma}$$

(Ec. 2.7)

Aunque la ecuación de Bernoulli es aplicable a una gran cantidad de problemas prácticos, existen algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta con el fin de aplicar la ecuación de manera adecuada.

- Es válida solamente para fluidos incompresibles puesto que la densidad del fluido se considera constante en las dos secciones de la tubería.
- No se consideran dispositivos mecánicos entre las dos secciones de interés que pudieran agregar o eliminar energía del sistema, ya que la ecuación establece que la energía total del fluido es constante.
- No se considera la transferencia de calor hacia dentro o fuera de la tubería.
- No se consideran pérdidas de energía debidas a la fricción.

Según Crane Co., (1982). En la realidad ningún sistema satisface todas estas restricciones. Sin embargo, existen muchos sistemas de tuberías para los cuales solamente se tendrá un error despreciable cuando se desee aplicar la ecuación de Bernoulli. Por otro lado, el uso de tal ecuación puede permitir una rápida estimación de cualquier problema en particular. En la práctica todos los fluidos reales presentan viscosidad y la aplicación de la ecuación de Bernoulli resulta inapropiada debido a la importancia relativa de las fuerzas viscosas. En efecto, la presencia de los esfuerzos viscosos hace que el fluido deba emplear parte de su energía mecánica en compensar el trabajo de oposición de las fuerzas viscosas (trabajo no reversible), por lo que paulatinamente se produce una transformación de la energía mecánica en energía interna. (Crane Co., 1982).

Esta transformación se contabiliza como una disminución progresiva de la pérdida de energía dinámica del fluido h_f , por efecto de la fricción.

$$h_f = \left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \right) \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde:

h_f = pérdida de carga por fricción en la tubería, ft

Z_1 = altura o elevación potencial inicial, ft

Z_2 = altura o elevación potencial final, ft

P_1 = presión absoluta de entrada, lbf/ft²

P_2 = presión absoluta de salida, lbf/ft²

γ = peso específico del líquido, lbf/ft³

Existen otras formas de pérdidas de energía que provocan la disminución de la presión del flujo, estas pueden ser continuas a lo largo de todo el conducto (pérdidas de energía primarias) o localizadas (pérdidas de energía secundarias).

Es evidente que la circulación de un fluido en tuberías no podría entenderse sin las pérdidas de energía; de no existir las pérdidas podrían transferirse caudales enormes entre pequeños desniveles. Además, durante la práctica son las que determinan los caudales circulantes en función de la diferencia de alturas disponibles y el reparto de caudales entre las diferentes conducciones de tuberías complejas.

2.27.6.1 Pérdidas de Energía Primarias

Según Crane Co., (1982). Las pérdidas de energía primarias o pérdidas de carga por fricción se definen como las pérdidas de energía del fluido necesarias para vencer la fricción debido al rozamiento que experimenta las moléculas del fluido con la pared interna de la tubería. La fricción puede ser de dos tipos: el rozamiento de unas capas del fluido con otras (régimen laminar) o el choque de las partículas del fluido entre sí (régimen turbulento).

Las pérdidas de energía primarias se definen también como una pérdida o caída de presión en el sentido del flujo, debido al efecto del rozamiento entre el fluido y las paredes internas de la tubería que provocan una disminución de la presión. Su determinación puede efectuarse mediante la ecuación general de caída de presión conocida como la ecuación de Darcy-Weisbach, la cual postula que la pérdida de energía es directamente proporcional a la longitud de la tubería y al cuadrado del flujo del fluido e inversamente proporcional a su densidad y al diámetro interior de la tubería.

$$\Delta P = 3.36 \times 10^{-6} \left(f \frac{L}{d_i^5} \frac{W^2}{\rho} \right)$$

(Ec. 2.9)

Donde:

ΔP = caída de presión por fricción en la tubería, psi

f = factor de fricción de Darcy, adimensional

L = longitud de la tubería, ft

W = flujo másico del fluido, lbm/h

d_i = diámetro interior de la tubería, in

ρ = densidad del fluido a la temperatura de operación, lbm/ft³

Esta ecuación es válida tanto para flujo laminar como turbulento para cualquier líquido cuya densidad permanece razonablemente constante a través de una tubería de

longitud recta y de diámetro constante, ya sea horizontal, vertical o inclinada. Sin embargo, para el caso de tuberías de diámetro variable la diferencia de presión debido a los cambios de velocidad deben hacerse de acuerdo a la ecuación de Bernoulli (Rocha, 2007). El valor del factor de fricción de Darcy, f , en la ecuación 1.9, puede calcularse de forma analítica conociendo primordialmente el tipo de régimen de flujo (laminar o turbulento) que presenta el fluido en el interior de la tubería mediante un parámetro conocido como el número de Reynolds, Re .

$$Re = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu} = \frac{6.31 \cdot W}{d_i \cdot \mu}$$

(Ec. 2.10)

Donde:

Re = número de Reynolds, adimensional

D = diámetro interior de la tubería, ft

V = velocidad del fluido, ft/s

ρ = densidad del fluido a la temperatura de operación, lbm/ft³

μ , = viscosidad dinámica del fluido a la temperatura de operación, lbm/(ft·s)

W = flujo másico del fluido, lbm/h

d_i = diámetro interior de la tubería, in

μ = viscosidad dinámica del fluido a la temperatura de operación, cP

Según Crane Co., (1982). El número de Reynolds es un número proporcional que relaciona las fuerzas dinámicas (energía cinética) y las fuerzas viscosas (resistencia del movimiento del fluido debido a su viscosidad) (Rodríguez, 2008). Este valor permite caracterizar el tipo de flujo presente e el interior de la tubería. Para valores menores a 2000 el flujo se comporta de forma laminar, aquí las partículas del fluido se mueven en líneas rectas paralelas al eje del conducto. La transición de flujo laminar uniforme a flujo turbulento generalmente ocurre cuando el número de Reynolds se incrementa de aproximadamente 2000 a 4000, este efecto ocurre debido a los cambios de diámetros o derivaciones de la tubería. Mientras que para valores mayores a 4000 el flujo se torna turbulento, las partículas se mueven de una manera caótica formando vórtices y remolinos, la fricción desarrollada es debido a la rugosidad de las paredes internas de la tubería producto del tipo de material con la que fue fabricado o debido a los problemas de envejecimiento.

Flujo laminar: $Re < 2000$

Flujo de transición: $2000 < Re < 4000$

Flujo turbulento: $Re > 4000$

No obstante, se tiene que a velocidades iguales las tuberías más pequeñas resultan relativamente más ásperas que las grandes, por lo tanto las tuberías de gran diámetro producirán menos pérdidas de fricción que las de menor diámetro. Una vez determinado el tipo de flujo que circula por el interior de la tubería, con base al número de Reynolds es posible calcular el factor de fricción de Darcy, f . Para el caso de tuberías lisas o rugosas en régimen laminar ($Re < 2000$) puede deducirse matemáticamente por medio de la ecuación de Hagen-Poiseuille.

$$f = \frac{64}{Re}$$

(Ec. 2.11)

Según Howard, (1982). Sin embargo, para el caso del régimen turbulento ($Re > 4000$) el instituto de Hidráulica y la mayoría de ingenieros consideran la ecuación de Colebrook & White (1939), como la más aceptable para calcular f , debido a su mejor aproximación al comportamiento de las tuberías comerciales. Esta ecuación es válida para tuberías de pequeño y gran diámetro de superficies lisas o rugosas que manejan caudales de diferentes intervalos y de viscosidad.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right]$$

(Ec. 2.12)

Donde:

f = factor de fricción de Darcy, adimensional

ε = rugosidad absoluta de la tubería, ft

D = diámetro interior de la tubería, ft

Re = número de Reynolds, adimensional

La mayoría de los textos bibliográficos referente a tuberías proporcionan abundante información sobre la rugosidad absoluta de los distintos materiales a diferentes condiciones de servicio.

2.27.6.2 Pérdidas de Energía Secundarias

Las pérdidas de energía secundarias o pérdidas de carga por accesorios se definen como las pérdidas de energía del fluido necesarias para vencer la fricción debido al rozamiento de las moléculas en presencia de una válvula o accesorio (Guaycochea, 1992). Cuando la dirección del flujo se altera de forma parcial o total debido a la presencia de cualquiera de estas singularidades, perturba el flujo normal de la tubería provocando una turbulencia y consecuentemente una pérdida de energía o pérdida de presión adicional, disipando finalmente esta porción de energía en forma de calor

debido al cambio forzado de la dirección de las partículas del fluido. El objetivo principal de este fenómeno durante el transporte en tuberías es la de producir suficiente fricción para controlar o dirigir la trayectoria del flujo.

2.27.6.3 Método De Longitudes Equivalentes

Es común que durante el diseño de tuberías se requiera de la disposición de válvulas o acoplamientos (accesorios) para cumplir con las especificaciones de la instalación para los sistemas de circulación de fluidos. Las válvulas se emplean para controlar la cantidad de flujo; las cuales pueden ser de globo, ángulo, compuerta, mariposa, retención y muchas más. En cambio los accesorios permiten dirigir la trayectoria del flujo o hacer que cambie su volumen, estas incluyen codos de varios diseños, tes, reductores, boquillas y orificios. Las pérdidas de carga o de presión producidas por las válvulas o accesorios pueden determinarse por medio del método de longitudes equivalentes. Este método consiste en determinar las pérdidas secundarias como si fueran primarias, es decir; que una válvula o accesorio del mismo diámetro y de longitud equivalente a un mismo tramo de tubería, ambos producen la misma pérdida de energía o de presión bajo las mismas condiciones. Es por ello que las pérdidas secundarias se calculan como si fueran primarias.

Las longitudes equivalentes pueden determinarse mediante el uso de nomogramas con base a un diámetro de tubería definido, como se muestra en la Figura 44. El inconveniente de su empleo radica en que se pueden obtener resultados variables, es decir; dependiendo la interpretación individual de la lectura en el nomograma se pueden tener datos diferentes de longitudes equivalentes. A pesar de que su uso resulte ser muy práctico, su empleo es discutible si la importancia relativa de las pérdidas secundarias es tan considerable, ya que puede conducir a errores y lo más preocupante aún es afirmar que la pérdida que se evaluará finalmente será menor que la real.

Otra forma de determinar las longitudes equivalentes de las válvulas o accesorios es utilizando datos reportados en tablas de referencias de longitudes equivalentes expresados en diámetros de tubería Le/D , o simplemente en longitudes equivalentes Le .

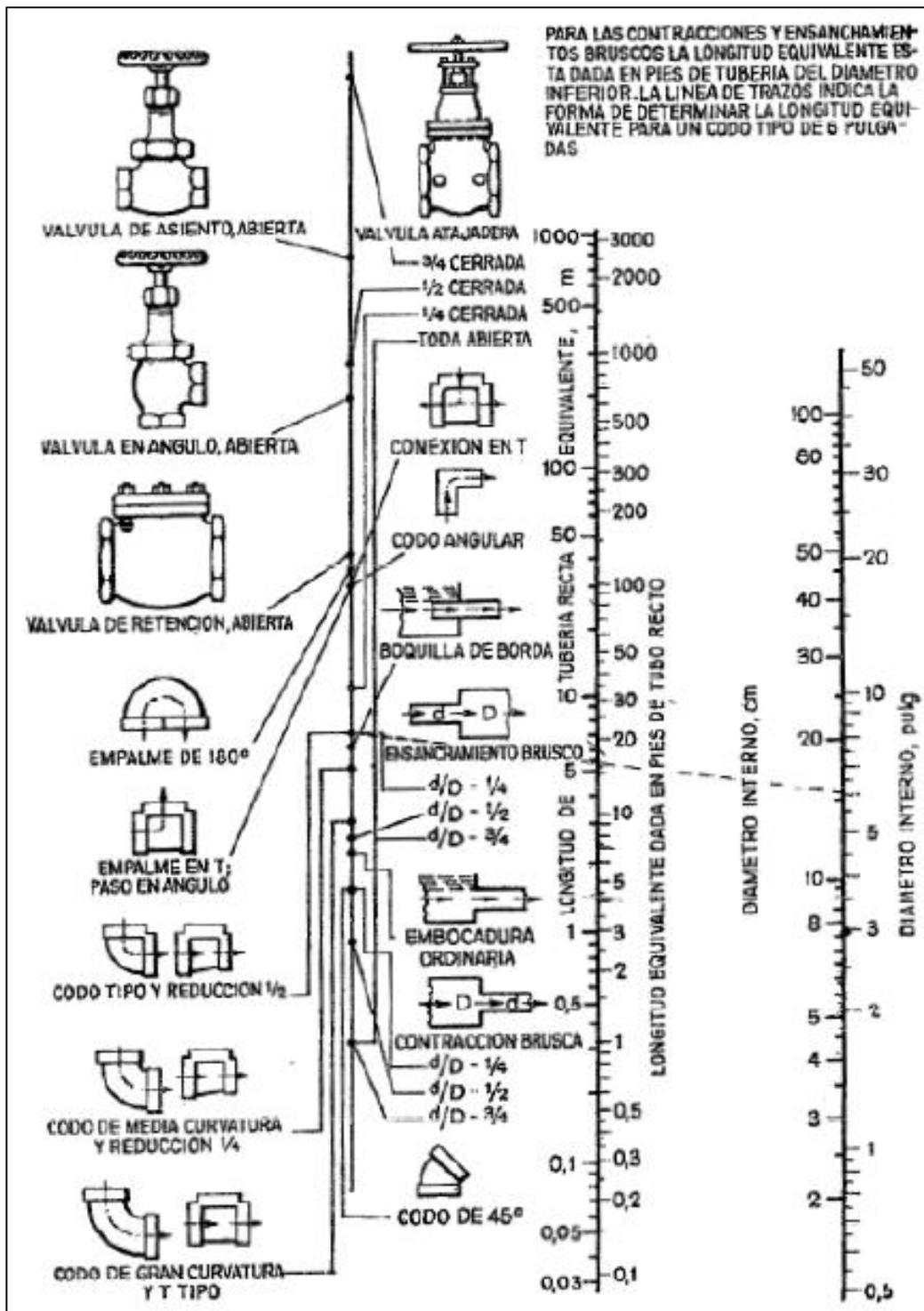


Figura 44: Nomograma para la determinación de longitudes equivalentes de accesorios. La longitud equivalente total de las válvulas y accesorios presentes en el sistema puede determinarse de la siguiente manera:

$$L_{eq} = \sum \left(\frac{L_e}{D} \right) \cdot D = \sum L_e$$

(Ec. 2.13)

Donde:

L_{eq} = longitud equivalente total de las válvulas y accesorios, ft

L_e/D = longitud equivalente en diámetro de tubería de una válvula o accesorio, adim.

D = diámetro interior de la tubería, ft

L_e = longitud equivalente de una válvula o accesorio, ft

Puesto que se había mencionado anteriormente que la tubería y la válvula o accesorio de un mismo diámetro y longitud equivalente producen la misma pérdida de presión, puede determinarse la caída de presión producida por estos aditamentos mediante la ecuación de Darcy-Weisbach, empleando la longitud equivalente total.

Ecuación de Darcy-Weisbach para una tubería:

$$\Delta P = 3.36 \times 10^{-6} \left(f \frac{L}{d_i^5} \frac{W^2}{\rho} \right)$$

Como ambos producen la misma caída de presión, se tiene que:

$$\Delta P = \Delta P_{acc}$$

$$L \rightarrow L_{eq}$$

$$\Delta P_{acc} = 3.36 \times 10^{-6} \left(f \frac{L_{eq}}{d_i^5} \frac{W^2}{\rho} \right)$$

(Ec. 2.14)

Donde:

ΔP = caída de presión por fricción de la tubería, psi

ΔP_{acc} = caída de presión por fricción total de las válvulas y accesorios, psi

L_{eq} = longitud equivalente total de las válvulas y accesorios, ft

f = factor de fricción de Darcy, adimensional

W = flujo másico del fluido, lbm/h

d_i = diámetro interior de la tubería, in

ρ = densidad del fluido a la temperatura de operación, lbm/ft³

Por lo tanto, para determinar la caída de presión por fricción total de la tubería (tubería más válvulas y accesorios), se tiene:

$$\Delta P_T = \Delta P + \Delta P_{acc}$$

$$L_T = L + L_{eq}$$

$$\Delta P_T = 3.36 \times 10^{-6} \left(f \frac{L_T W^2}{d_i^5 \rho} \right) = 3.36 \times 10^{-6} \left(f \frac{(L + L_{eq}) W^2}{d_i^5 \rho} \right) \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Donde:

ΔP_T = caída de presión por fricción total de la tubería, psi

L_T = longitud equivalente total de la tubería, ft

L = longitud de la tubería, ft

L_{eq} = longitud equivalente total de las válvulas y accesorios, ft

f = factor de fricción de Darcy, adimensional

W = flujo másico del fluido, lbm/h

d_i = diámetro interior de la tubería, in

ρ = densidad del fluido a la temperatura de operación, lbm/ft³

Según Crane Co., (1982). Este método considera que los valores de la rugosidad absoluta de la tubería no cambian sustancialmente, ya sea por problemas de corrosión, erosión o incrustación. Además se considera que son independientes del número de Reynolds en situaciones de régimen turbulento, y salvo casos especiales en que el flujo se aproxima a las condiciones del régimen laminar, ya que varía de forma distinta para cada accesorio.

2.27.6.4 Método de Coeficientes de Resistencia, K

Según Crane Co., (1982). Debido a que las pérdidas secundarias son producidas por una disipación de energía motivada por las turbulencias, también suelen expresarse en función de la altura de velocidad corregida, mediante un coeficiente de resistencia denominado K . Este coeficiente representa la pérdida de altura de velocidad para una válvula o accesorio y está normalmente asociada a un diámetro a la cual se refiere la velocidad. La velocidad en una tubería se obtiene mediante la presión o altura estática, y el descenso de la altura estática o pérdida de presión debida a la velocidad se define como altura de velocidad.

$$h_L = \frac{V^2}{2g}$$

(Ec. 2.16)

Así, una determinada cantidad de flujo que pasa por una válvula o accesorio en una línea de tubería causa también una reducción de la altura de velocidad, esto es el coeficiente de resistencia K .

$$h_{acc} = K \frac{V^2}{2g}$$

(Ec. 2.17)

Donde:

hL = pérdida de carga de velocidad, ft

h_{acc} = pérdida de carga de una válvula o accesorio, ft

K = coeficiente de resistencia de una válvula o accesorio, adimensional

V = velocidad del fluido, ft/s

g = constante gravitacional, 32.2 ft/s²

La determinación de la longitud equivalente con base a los coeficientes de resistencia, se basa en el mismo concepto de pérdida de carga o energía entre una tubería y una válvula o accesorio, utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach expresada en términos de carga.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

(Ec. 2.18)

Donde:

h_f = pérdida de carga por fricción de la tubería, ft

f = factor de fricción de Darcy, adimensional

L = longitud de la tubería, ft

D = diámetro interior de la tubería, ft

V = velocidad del fluido, ft/s

g = constante gravitacional, 32.2 ft/s²

Como la tubería y la válvula o accesorio producen la misma pérdida de carga, se tiene que:

$$K = f \left(\frac{L_e}{D} \right)$$

(Ec. 2.19)

Como se observa en la ecuación 1.20, el coeficiente de resistencia puede determinarse utilizando la relación de longitudes equivalentes en diámetros de tubería L_e/D , y el factor de fricción de Darcy f . Así, la longitud equivalente de una válvula o accesorio puede determinarse como sigue:

$$L_e = K \frac{D}{f}$$

(Ec. 2.20)

$$L_{eq} = \sum K \frac{D}{f} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Donde:

L_e = longitud equivalente de una válvula o accesorio, ft

L_{eq} = longitud equivalente total de las válvulas y accesorios, ft

K = coeficiente de resistencia de una válvula o accesorio, adimensional

D = diámetro interior de la tubería, ft

f = factor de fricción de Darcy, adimensional

Por lo tanto, es posible determinar también la caída de presión de una válvula o accesorios mediante la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$\Delta P = \Delta P_{acc}$$

$$L \rightarrow L_e = K \frac{D}{f} \rightarrow L_{eq} = \sum L_e$$

$$\Delta P = 3.36 \times 10^{-6} \left(f \frac{L}{d_i^5} \frac{W^2}{\rho} \right) \rightarrow \Delta P_{acc} = 3.36 \times 10^{-6} \left(f \frac{L_{eq}}{d_i^5} \frac{W^2}{\rho} \right)$$

O en su caso:

$$L_e = K \frac{D}{f} \rightarrow L_{eq} = \sum K \frac{D}{f}$$

$$\Delta P = 3.36 \times 10^{-6} \left(f \frac{L_{eq}}{d_i^5} \frac{W^2}{\rho} \right) \rightarrow \Delta P_{acc} = 2.8 \times 10^{-7} \left(\frac{K}{d_i^4} \frac{W^2}{\rho} \right)$$

$$\Delta P_{acc} = 2.8 \times 10^{-7} \left(\frac{\sum K}{d_i^4} \frac{W^2}{\rho} \right)$$

(Ec. 2.22)

Donde:

ΔP_{acc} = caída de presión por fricción total de las válvulas y accesorios, psi

K = coeficiente de resistencia de una válvula o accesorio, adimensional

W = flujo másico del fluido, lbm/h

d_i = diámetro interior de la tubería, in

ρ = densidad del fluido a la temperatura de operación, lbm/ft³

Por consiguiente, el coeficiente de resistencia K , es independiente del factor de fricción y del número de Reynolds y puede tratarse como una constante para cualquier válvula o accesorio presente en el sistema, bajo cualquier condición de flujo incluida el régimen laminar. Estos valores de coeficientes de resistencia son determinados experimentalmente por investigadores y reportados en tablas de referencias y

nomogramas. Cuando el fabricante proporciona este valor para cualquier válvula o accesorio en particular, lo recomendable es emplearlo durante los cálculos. En teoría es una constante para todas las medidas de un cierto diseño o líneas de válvulas y accesorios, si todas las medidas fueran geoméricamente similares. Sin embargo, la similitud geométrica es difícil que ocurra; si lo fuera, sería porque el diseño de las válvulas y accesorios se regirían por costos de fabricación, normas, resistencia estructural y otras consideraciones (Crane Co., 1982).

Cuando se determina el coeficiente de resistencia K mediante la ecuación 1.20, en la que emplea la relación de la longitud equivalente en diámetros de tubería, es necesario determinar primero el número de Reynolds y posteriormente el factor de fricción de Darcy f . Este método es más lógico que el extendido de longitudes equivalentes L_e y L_e/D , ya que este método requiere de la suposición de un factor fricción constante, sabiendo incluso que dicho factor varía con el flujo. En cambio el método de coeficientes de resistencias determina el factor de fricción, por lo cual tiene un efecto significativo en condiciones de régimen turbulento y más aún cuando se encuentra dentro del régimen laminar, ya que evita una importante sobrestimación de la pérdida de presión.

2.27.6.5 Efectos de la Velocidad de los Fluidos Incompresibles en Tuberías

Durante el transporte en tuberías generalmente la velocidad del líquido es considerada uniforme siempre y cuando fluya a través de una sección de diámetro constante. Técnicamente puede ser determinada la velocidad media o promedio del flujo en cualquier sección transversal de una tubería a partir de la siguiente ecuación:

$$V = \frac{0.0509 \cdot W}{d_i^2 \cdot \rho} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

Donde:

V = velocidad del fluido, ft/s
 W = flujo másico del fluido, lbm/h
 d_i = diámetro interior de la tubería, in
 ρ = densidad del fluido a la temperatura de operación, lbm/ft³

La velocidad determina el tipo de régimen de flujo al cual se mueve el fluido. Este parámetro es una consideración de diseño muy importante debido al efecto proporcional que origina sobre el rozamiento. El rozamiento ocasiona una turbulencia en la corriente y opone resistencia al flujo lo que da como resultado un aumento de la presión en la tubería. Por lo tanto es necesario establecer velocidades recomendadas

debido a que puede ser perjudicial tanto una velocidad demasiado baja como una demasiado alta. Efectos de una velocidad excesiva:

- Origina golpes de ariete cuyo valor de sobrepresión puede provocar roturas.
- Aceleración del desgaste interior de la tubería por efectos de la corrosión por erosión.
- Produce pérdidas excesivas de carga.
- Niveles de ruido excesivos.
- Dimensionamiento del diámetro de la tubería menor de lo esperado.

Efectos de una velocidad inferior:

- Propicia la formación de depósitos (sustancias en suspensión) que pudiera presentar el fluido, provocando obstrucciones en el interior de la tubería.
- Implica un diámetro de tubería excesivo, sobredimensionado, con lo que la instalación se encarece de forma innecesaria.
- Reducción de la demanda del flujo requerido y como consecuencia un aumento de la potencia de la bomba.
- Formación de burbujas de aire que propiciaría a la presencia de cavitación en la bomba.

Un valor límite recomendado de la velocidad para el transporte de líquidos en tuberías es de 10 ft/s, este valor es una referencia general que se emplean en situaciones de dimensionamiento para tuberías de succión y descarga de bombas. Sin embargo, existen otros valores de referencia para dimensionar tuberías, las cuales dependen de cierta forma de las características del líquido (corrosivo, erosivo, viscoso, etc.) o en relación a la demanda requerida por el proceso. Estos intervalos de referencia se derivan de situaciones reales presentados en la práctica, es decir; producto de la experiencia, el cual ha servido de base para el diseño de tuberías de proceso (PEMEX, 2002).

La consideración de los criterios de velocidad recomendada en el dimensionamiento ha permitido durante la práctica mantener una condición de servicio adecuada del sistema con la finalidad de evitar algún deterioro prematuro de la tubería o un mal funcionamiento de la bomba. Básicamente lo que se trata durante el diseño de tuberías es utilizar valores referencias como punto de partida, basándose en condiciones de servicios similares. En el Anexo C se presenta una lista de velocidades recomendadas para el transporte de líquidos más comunes en la industria.

2.27.7 Efecto de la Caída de Presión de los Fluidos Incompresibles en Tuberías

El transporte de un líquido a través de una tubería viene acompañado de una pérdida de energía disponible denominada comúnmente como caída de presión o pérdida de carga, resultado de la resistencia que presenta un fluido en movimiento cuando entra en contacto con la superficie interna de la tubería. Esta pérdida de carga se manifiesta como una disminución de la presión en el sentido del flujo. La caída de presión excesiva perjudica considerablemente a la tubería y a la bomba. El fenómeno que más frecuentemente se presenta es el golpe de ariete. Esta descarga dinámica de presión resulta cuando en un instante toda la energía en movimiento se transforma en un aumento de presión, debido a que el flujo se detiene repentinamente por el cierre de una válvula. Los golpes de ariete por presión pueden ser lo suficientemente grandes para romper la carcasa de una bomba o reventar las tuberías, por lo tanto es recomendable considerar la caída de presión excesiva durante el dimensionamiento de tuberías (PDVSA, 1996).

También existen otras caídas de presión presentes en el trayecto de las tuberías que se manifiestan como una pérdida de energía adicional al sistema, tales como: válvulas, accesorios, medidores de flujo o equipos. Es por ello, que se debe tener especial cuidado cuando se proponen trayectorias preliminares para un sistema de bombeo, ya que se debe evitar el uso excesivo de accesorios, diferencias de altura y cambios de dirección, con la finalidad de evitar caídas de presión excesivas que perjudiquen al sistema y se vean reflejadas posteriormente en los costos de mantenimiento (Guaycochea, 1992). Para cuestiones prácticas durante el transporte de líquidos se considera como límite máximo recomendado una caída de presión de 2 psi por cada 100 ft, de longitud de tubería (2 psi/100 ft), con la finalidad de proporcionar una condición de servicio adecuada para la tubería y la bomba (Couper, 2003), (PEMEX, 2002).

2.28 SISTEMAS DE TUBERÍAS DE PROCESOS Y BOMBAS CENTRÍFUGAS EN PLANTAS INDUSTRIALES

La industria de Productos Criogénicos es uno de los procesos industriales más complejos, requiere una variedad de bombas, debido a las necesidades muy singulares que se tienen en algunos procesos, donde con frecuencia se necesitan fluidos de alta presión y temperatura relativamente bajas. Para cubrir determinadas condiciones de corrosión se han creado diseños específicos de bombas, llamadas bombas para procesos. Según la forma en que imparten la energía al líquido, las bombas de proceso se clasifican en bombas dinámicas (que imparten energía cinética mediante la acción de una fuerza centrífuga) y bombas de desplazamiento positivo (que imparten un desplazamiento parcial o total de un volumen de líquido mediante la acción de un dispositivo mecánico: pistón, diafragma, tornillo o de engranajes).

Las bombas dinámicas constituyen la mayor parte del servicio dentro de la industria, en especial las bombas centrífugas debido a las principales ventajas que se le atribuyen, tales como:

- Su sencillez de operación.
- Bajo costo inicial de adquisición.
- Manejo de grandes cantidades de flujo.
- Variedad para manejar diversos líquidos.
- Descarga uniforme del flujo libre de pulsaciones.
- Fácil instalación que provee de un pequeño espacio.
- Funcionamiento silencioso.
- Mantenimiento económico.
- Adaptabilidad para su acoplamiento a un motor eléctrico o turbina.

Hoy en día las bombas centrífugas constituyen no menos del 80% de la producción mundial de bombas, estas se encuentran disponibles en una amplia variedad de capacidades que van de 2 gpm a 10,000 gpm y de presiones manométricas de descarga de hasta 7,000 psig, donde el tamaño y el tipo más adecuado para una aplicación dada, sólo puede determinarse mediante un estudio del sistema de bombeo.

Según Kenneth, (1992). La función principal de una bomba centrífuga es la de producir energía cinética mediante la acción de una fuerza centrífuga donde finalmente se transforma en energía de presión. Esto es con la finalidad de que el fluido efectúe un trabajo tal como circular por una tubería y subir a una determinada altura.

Físicamente, el líquido entra hacia el centro del impulsor donde su energía cinética es aumentada debido a la acción centrífuga producida por las aspas del impulsor. A medida que el líquido sale por la zona de descarga, esta es transformada finalmente en energía de presión. La fuerza centrífuga producida depende tanto de la velocidad de rotación y del diámetro del impulsor, así como la densidad del líquido.

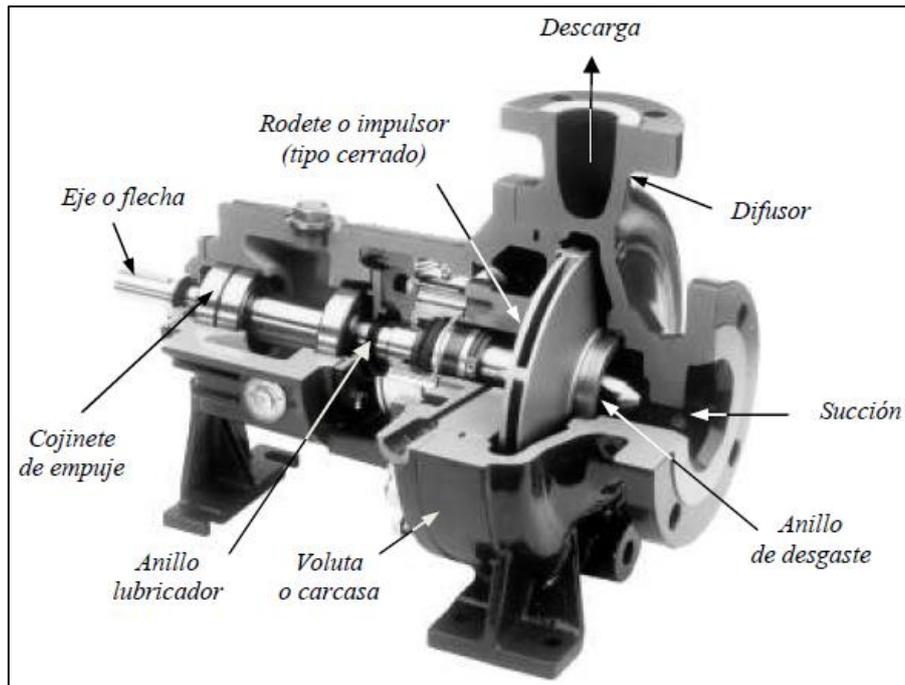


Figura 45: Partes de una Bomba Centrífuga Tipo Radial de Simple Succión

Una de las clasificaciones más comunes de las bombas centrífugas se basa en el diseño del impulsor. Los impulsores pueden ser del tipo de succión simple o doble, se le llama de simple succión si el líquido entra por un lado del impulsor y de doble succión si entra por ambos lados.

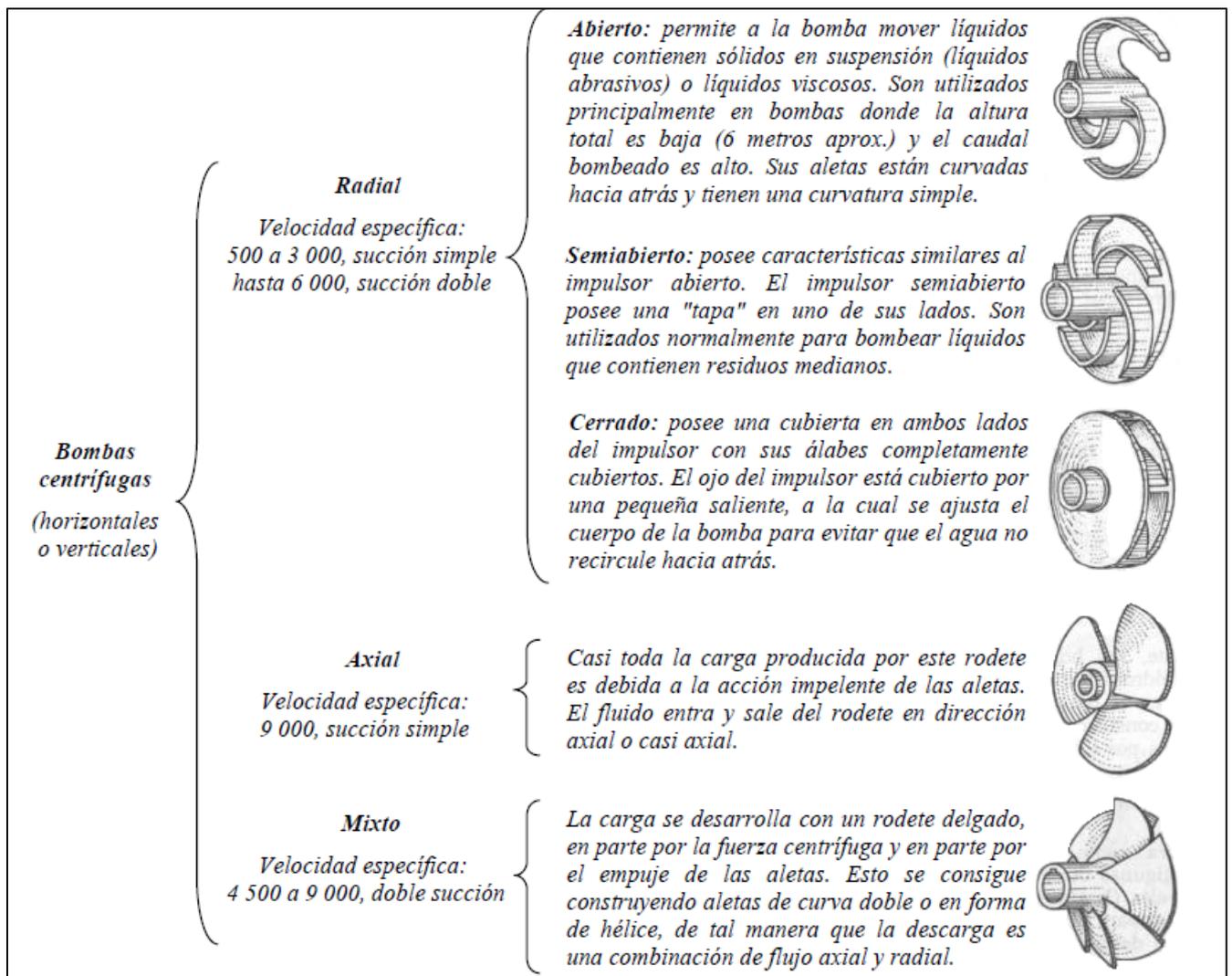


Figura 46: Clasificación de Bombas Centrífugas de Acuerdo al Diseño del Impulsor

Una selección adecuada de la bomba podrá garantizar los requerimientos necesarios para cualquier servicio en particular a modo que resulte rentable, se faciliten las tareas de mantenimiento y consecuentemente se eviten fenómenos indeseables de operación como la cavitación. Esto es en todo contraste al tipo de bomba a utilizar: centrífuga, rotatoria o reciprocante.

2.28.1 Sistema de Succión

Cuando un proceso requiere de la instalación de cualquier bomba lo primero es el diseño preliminar del sistema, este punto debe estudiarse con cuidado prestando especial interés en la tubería de succión para evitar severos problemas, tales como:

- El sobredimensionamiento de tuberías.
- Carga neta positiva de succión disponible insuficiente.
- Estimación errónea sobre la capacidad de la bomba.

- Mala distribución del sistema de tuberías provocando una inestabilidad hidráulica.
- Excesos de accesorios que propicien a la vibración y ruido dentro de la tubería.
- Efectos de golpes de ariete.
- Problemas de cavitación debido a la presencia de aire.
- Desgaste excesivo de las chumaceras de la bomba.

Un análisis correcto de las condiciones del proceso, relaciones hidráulicas y configuración del sistema asegurará el no tener problemas con la instalación y el funcionamiento adecuado de la bomba. La clave para realizar una selección adecuada de la bomba, radica en el conocimiento total del sistema en que trabajará la bomba. El ingeniero que especifica una bomba, puede hacer una selección errónea por no haber investigado los requisitos totales del sistema y determinar cuál debe ser el rendimiento adecuado de la bomba. Además, cuando la responsabilidad de la selección de la bomba está en manos del representante del proveedor, puede serle difícil o imposible determinar los requisitos totales. Es por eso que la primera regla para la selección de una bomba es el conocimiento completo del sistema.

El punto de partida sobre esta información se obtiene a partir de los diagramas de flujo del proceso (datos del balance de materia y energía), diagramas de tubería e instrumentación, planos de localización general, planos isométricos y hojas de datos de los equipos. A partir de esta información puede obtenerse elementos importantes que se tomarán en cuenta para el diseño del sistema de bombeo, tales como:

- Las características del fluido: densidad, viscosidad, presión de vapor, corrosividad, etc. Estos parámetros son obtenidos a las condiciones de temperatura en que operará la bomba, las cuales pueden ser determinadas con base a gráficas o programas de simulación.
- También, se obtienen referencias importantes como la capacidad de diseño y la temperatura de operación del líquido. La temperatura afecta relativamente a las características del fluido y consecuentemente en el diseño y en el servicio de la bomba, por ejemplo; si la densidad se ve afectada puede originar una disminución de la carga diferencial del sistema lo que requerirá más consumo de energía por parte de la bomba. La viscosidad por ejemplo influye en la selección del tipo de bomba, la eficiencia, carga, capacidad y el aumento en la fricción en el interior de las tuberías. Un aumento de la presión de vapor afecta la condición de servicio de la bomba debido al fenómeno producido por la cavitación.
- Asimismo, se obtienen informaciones adicionales, tales como: la ubicación del equipo, presiones en los recipientes de almacenamiento, fluctuaciones de nivel, equipos intermediarios, y un conocimiento preliminar sobre trayectoria geométrica de la tubería

y los aditamentos (válvulas o accesorios) que serán considerados para controlar o dirigir el flujo.

Una vez localizada esta información se debe tener cuidado en proponer la configuración preliminar del sistema de bombeo de acuerdo a las especificaciones del proceso y de la ubicación del equipo. En la Figura 1.7, se muestran algunas configuraciones típicas de columnas estáticas empleadas en los sistemas de bombeo.

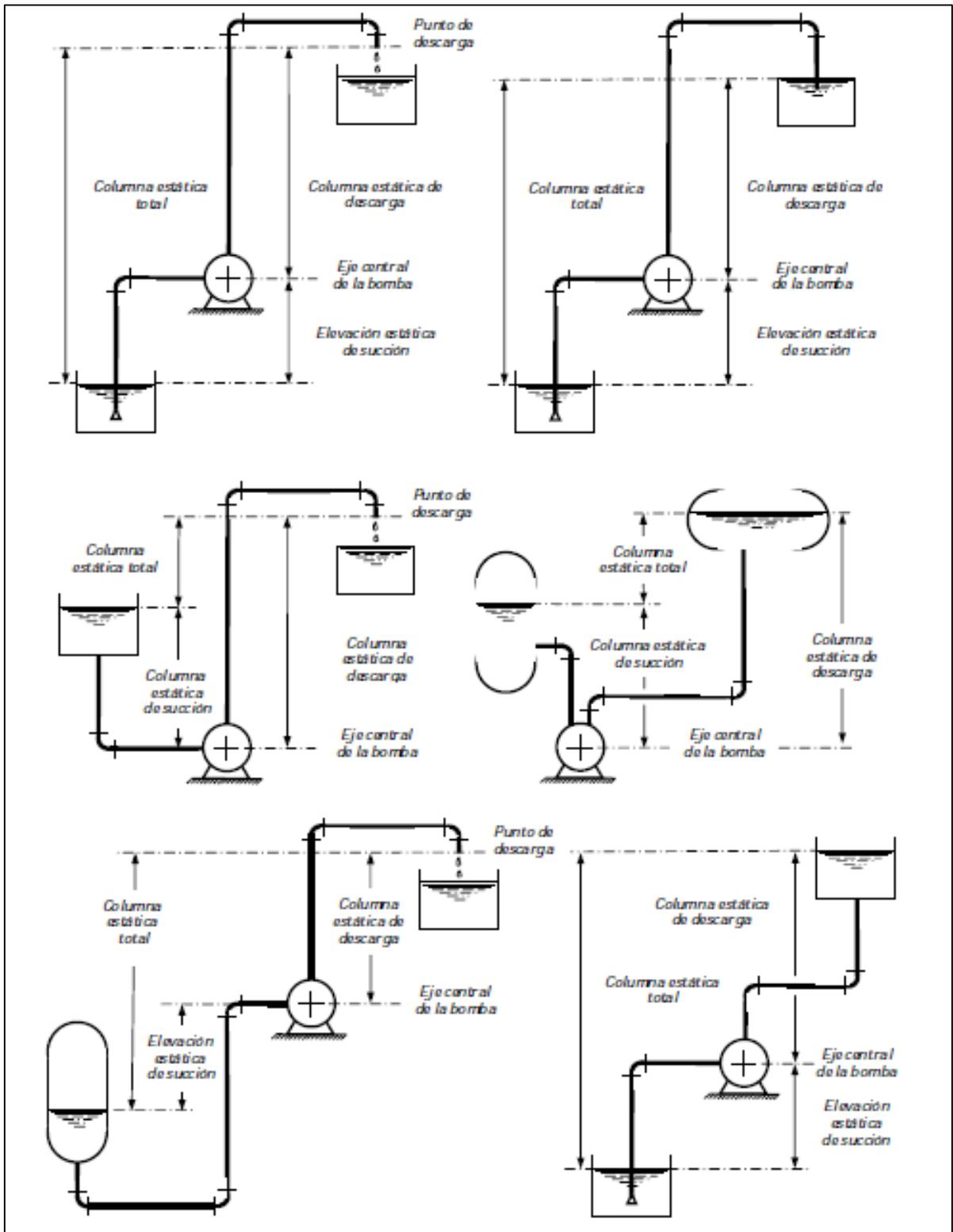


Figura 47: Configuraciones Típicas de Columnas Estáticas

2.28.1.1 Efectos de la Presión de Vapor

La presión de vapor o presión de saturación se define como la presión de vapor de un líquido que ejerce sobre su propia superficie líquida a una temperatura determinada. Por ejemplo; si un líquido se almacena en un recipiente o domo cerrado al paso del tiempo sus moléculas se evaporaran por encima de él llenándola de forma completa estableciendo un equilibrio. Aquí, las fases reciben la denominación de líquido saturado y vapor saturado, este vapor ejerce una presión al igual que un gas y suele llamarse en términos comunes como *presión de vapor*.

Los líquidos volátiles que se encuentran confinados en un recipiente se deben mantener a una temperatura determinada y a una presión que garantice que sus moléculas se mantengan estrechamente unidas para evitar se desprenderán en forma de vapor y se produzcan burbujas a alta presión.

Puesto que la presión de vapor es independiente de la cantidad de líquido en el recipiente, los dos factores que determinan su comportamiento son la naturaleza del líquido y la temperatura. La temperatura afecta relativamente a la presión de vapor originando que se expanda o se evapore más líquido mientras que su naturaleza se define por su volatilidad. La volatilidad es una característica propia de un líquido que especifica cual mayor puede ser su presión de vapor. Los hidrocarburos líquidos o condensados poseen una presión de vapor relativamente mayor en comparación con la del agua debido a la disminución sus fuerzas intermoleculares.

Las bombas centrífugas requieren de flujos libres de vapores desde la boquilla de entrada en la succión hacia el centro del impulsor para funcionar de modo satisfactorio. La presión de operación en cualquier punto nunca debe reducirse más allá de la presión de vapor correspondiente a la temperatura del líquido. Si esto ocurre la presión de vapor se liberará por la acción de la bomba ocasionando que el flujo del líquido se interrumpa. Es por ello, que siempre se debe tener suficiente energía disponible en la línea succión para contrarrestar esta disminución en la presión de bombeo y evitar finalmente el fenómeno conocido como cavitación (Viejo, 2003).

2.28.1.2 Efectos de la Cavitación

El término cavitación implica un proceso dinámico de formación de burbujas en un líquido. Este fenómeno se produce en el interior de las bombas centrífugas cada vez que la presión de un líquido disminuye más allá de su presión de vapor correspondiente a su temperatura, ocasionando que el líquido se evapore y se formen burbujas de vapor. Cuando esto sucede dentro de una bomba en operación, esta perturbación en el líquido es arrastrado hasta una zona dentro del impulsor donde alcanza una mayor

presión y súbitamente se produce una explosión de burbujas, un efecto similar al golpe de ariete, provocando a su vez daños internos como: ruido, vibración, desgaste o roturas del impulsor e incluso roturas en la carcasa de la bomba, por lo tanto estos efectos reducen la eficiencia y la vida útil de servicio de la bomba.

Las causas que originan la aparición de este fenómeno y los que generalmente se recomiendan que se eviten son los siguientes:

- Carga neta disponible menor a la recomendada por el fabricante.
- Incremento en la temperatura del líquido.
- Capacidad mucho mayor a la capacidad de máxima eficiencia de la bomba.
- Velocidades más altas a las recomendadas por el fabricante.
- Disminución en la presión atmosférica producto de la diferencia de altitud.
- Disminución en la presión de operación.
- Incremento de las pérdidas por fricción debido al exceso de accesorios.
- Separación y contracción del flujo debido a un cambio en la viscosidad del fluido.

Otra recomendación favorable para evitar este tipo de incidentes, es el cebado. El cebado consiste en extraer el aire, gas o vapor que se encuentra en el interior de la bomba para evitar que se acumulen y provoquen la cavitación. Esta operación se realiza generalmente cuando se encuentra en una posición superior al tanque de aspiración. Las bombas pueden cebarse de dos formas; de manera automática o manual (mediante una válvula de purga).

La cavitación puede identificarse por la presencia de un ruido excesivo y vibraciones muy fuertes en el interior de la bomba, estos efectos se deben a causa de la explosión de las burbujas de vapor cuando la bomba opera a una presión excesiva. Esto indica que la carga neta positiva de succión disponible *NPSH_d*, es insuficiente teniendo como consecuencias problemas severos de operación, tales como:

- La disminución de la capacidad y el rendimiento de la bomba debido a la turbulencia y el bloqueo del paso del flujo.
- Severos daños estructurales del metal de la carcasa de la bomba y los alabes del impulsor producidos por la picadura y la erosión.

La severidad del deterioro del metal (formación de hoyuelos) que resulta de la cavitación tiene a incrementar a medida que aumentan los requerimientos del *NPSH disponible* debido al aumento en la fuerza de la explosión de las burbujas. Las bombas que operan con cavitación a caudales de flujo correspondientes a requerimientos de *NPSH disponible* entre 5 m a 6 m (16 ft a 20 ft) experimentarán un rápido deterioro del

metal, mientras que las bombas operadas con cavitación a niveles de requerimiento del *NPSH* de 1 m (3 ft) experimentan una larga vida de servicio entre las reparaciones del cuerpo de la bomba. (PDVSA, 1997).

Los ingenieros deben estar capacitados para detectar rápidamente los signos de la cavitación e identificar correctamente su tipo y la causa que la produzca, para así poder eliminarla o atenuarla con el fin de evitar pérdidas de producción, daños al equipo y lo peor de todo, lesiones al personal. Una comprensión correcta de estos conceptos es una herramienta clave para el diagnóstico y la solución a cualquier problema de bombeo.

2.28.1.3 Carga Neta Positiva de Succión, *N_{psH}*

El *NPSH* por sus siglas en inglés “*Net Positive Suction Head*” o carga neta positiva de succión es la energía disponible o requerida para forzar un líquido determinado a viajar a través de una tubería al centro del impulsor de una bomba sin vaporizarse. Su determinación implica la consideración de la energía potencial y de presión del sistema de succión.

2.28.1.4 Carga Neta Positiva de Succión Requerida, *N_{psHr}*

El *NPSH requerido* es la cantidad mínima de energía requerida o presión necesaria para que el líquido fluya sin vaporizarse desde la brida de entrada de la bomba hasta el centro del impulsor. Por lo general, es expresada como una carga de agua (pies del líquido) y corresponde a una característica individual para cada tipo bomba según el tipo de marca, diseño y modelo. Este valor es designado por el fabricante para una operación satisfactoria a las condiciones nominales especificadas.

2.28.1.5 Carga Neta Positiva de Succión Disponible, *N_{psHd}*

El *NPSH disponible* se define como la cantidad de energía disponible que posee la línea de aspiración de la bomba (independientemente del tipo de esta) por encima de la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo. Este valor depende de los cambios de presión, temperatura y de las características del sistema de succión, tales como: la presión absoluta y el nivel del líquido en el recipiente de succión, las pérdidas de energía por fricción (tuberías, válvulas y accesorios), la densidad y la presión de vapor del líquido. Si se varía cualquiera de estos parámetros el *NPSH_d* puede alterarse. En la Tabla 1.5 se presenta un resumen general sobre su comportamiento.

VARIABLES		NPSH DISPONIBLE
Nivel del líquido en el recipiente (columna estática de succión)	↑	↑
	↓	↓
Presión absoluta en el recipiente	↑	↑
	↓	↓
Densidad o gravedad específica del líquido	↑	↓
	↓	↑
Presión de vapor proporcional a la temperatura de operación	↑	↓
	↓	↑
Perdidas de energía por fricción	↑	↓
	↓	↑

(↑) Aumenta, (↓) Disminuye

Tabla 5: Variaciones del NPSH Disponible

Los líquidos puros requieren de un alto *NPSH disponible*, ya que todo el líquido tiende a vaporizarse a la misma condición de presión y temperatura, es decir; el líquido tiene un punto de ebullición único. En cambio los flujos de mezclas líquidas tales como; las corrientes típicas de refinería causan una reducción en el *NPSH requerido* con respecto al de las corrientes puras, porque sólo una porción de la mezcla ebulle inicialmente. Por lo tanto, el requerimiento del *NPSH* para hidrocarburos líquidos tiende a ser menor que la del agua a la misma temperatura (PDVSA, 1997).

Las bombas centrífugas con requerimientos bajos del *NPSH* permiten ahorros considerables en los costos de la instalación de los recipientes de succión y a ser menos afectados severamente por la cavitación debido a la insuficiencia del *NPSH* (PDVSA, 1997).

En la Tabla 06, se presentan cuatro configuraciones típicas de un sistema de succión, en las que pueden determinarse el *NPSH disponible*.

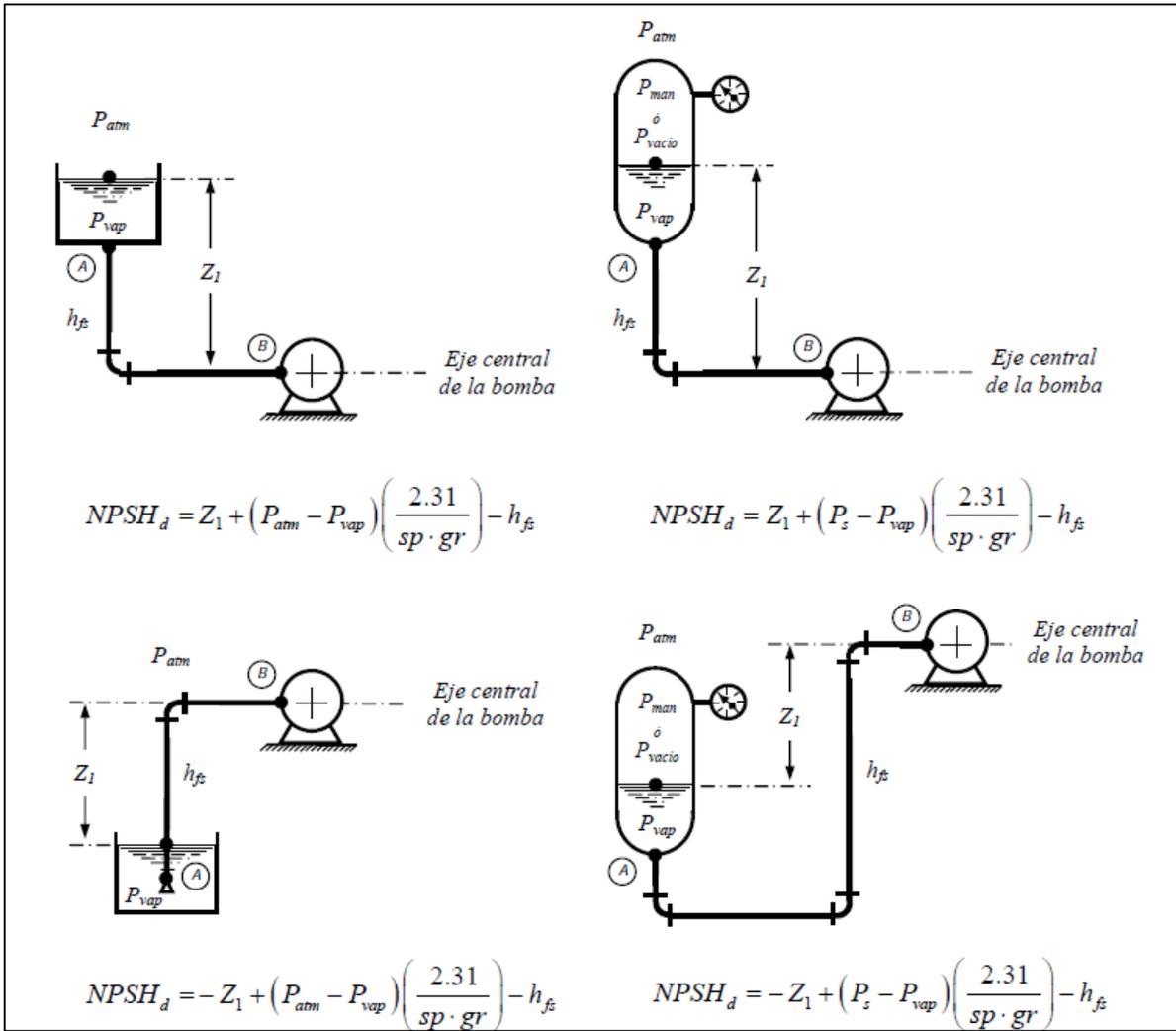


Figura 48: Determinación de la Carga Neta Positiva de Succión Disponible, de acuerdo al tipo de configuración del sistema de succión

$$NPSH_d = \pm Z_1 + (P_s - P_{vap}) \left(\frac{2.31}{sp \cdot gr} \right) - h_{fs}$$

(Ec. 2.24)

Donde:

$NPSH_d$ = carga neta positiva de succión disponible, ft

Z_1 = columna o elevación estática de succión, ft

P_s = presión absoluta sobre la superficie del líquido en el recipiente de succión ($P_{atm} + P_{man}$) ó ($P_{atm} - P_{vacío}$), psia

P_{man} = presión manométrica de operación, psig

P_{atm} = presión atmosférica o barométrica, psia

$P_{vacío}$ = vacío en el recipiente de succión, psia

P_{vap} = presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo, psia

2.31* = factor de conversión, ft

sp.gr. = gravedad específica del líquido, adimensional

hfs = pérdidas de carga por fricción total en la tubería de succión (*hf* + *hacc*), ft

hf = pérdidas de carga por fricción en la tubería del punto A al punto B, ft

hacc = pérdidas de carga por fricción de los accesorios en la tubería de succión del punto A al punto B, ft

* Es la altura de una columna de líquido que produce una presión de 1 psi en su base.

Cuando se selecciona un modelo específico de la bomba y se diseña su base, el *NPSH disponible* se puede corregir según la ubicación real del eje central de la bomba o la de la brida de succión, para establecer la comparación con el requerimiento del *NPSH requerido* de la bomba (PDVSA, 1997). Cuando el *NPSH disponible* cae por debajo del valor del *NPSH requerido* o la presión de succión sea menor que la presión de vapor, la bomba empezará a cavitarse y a perder eficiencia. Por lo tanto, es necesario que el *NPSH disponible* en la instalación sea mayor o igual que el *NPSH requerido* por la bomba y que la presión de succión sea mayor a la presión de vapor.

$$\begin{aligned} NPSH \text{ disponible} &\geq NPSH \text{ requerido} \\ \text{Presión de succión} &> \text{Presión de vapor} \end{aligned}$$

Mientras mayor sea el valor del *NPSH disponible* que el *NPSH requerido*, la bomba podrá trabajar en una amplia gama de capacidades. Como recomendación general se debe tener un margen mínimo de 0.6 m (2 ft) entre el *NPSH disponible* calculado y el *NPSH requerido*, es decir; que el valor del *NPSH disponible* sea mayor a 2 ft, al *NPSH requerido* por la bomba (PDVSA, 1997).

En el Anexo F se muestran algunos métodos para incrementar el *NPSH disponible* y reducir el *NPSH requerido* cuando se precisa de una instalación existente.

Normalmente este valor de referencia de 2 ft, diferirá dependiendo de la altura de la base, el tipo, tamaño y orientación de la bomba. Esta diferencia entre el nivel de referencia arbitrario y el nivel de referencia real por lo general es mínimo como para influir en la determinación de los requerimientos del cabezal en la mayoría de los servicios, pero es un factor de suma importancia en el establecimiento del *NPSH* que se dispone realmente para la bomba instalada, y debe verificarse por consiguiente cuando se seleccione la bomba y se realice el diseño de la base (PDVSA, 1996).

La norma API 610 (*Centrifugal Pumps for Petroleum Heavy Duty Chemical, and Gas Industry Services*) especifica que las boquillas de las bombas establecen los requerimientos del *NPSH disponible*. Para las bombas horizontales el requerimiento está referido al eje central y para las bombas verticales en la línea central de la brida de succión (PDVSA, 1996). Por lo tanto, es recomendable especificar el nivel de referencia de la bomba a la cual ha sido calculado tanto la presión de succión como el *NPSH disponible*, en especial atención a los sistemas de bombeo elevados sobre el nivel de piso, así como

las bombas de pozo profundo y bombas de agua de enfriamiento que están localizadas con respecto al nivel de la superficie del agua, en vez del nivel de piso (PDVSA, 1996).

2.28.1.6 Curvas Características de una Bomba Centrífuga

El rendimiento hidráulico de una bomba centrífuga incluye tres factores: la capacidad (expresada en unidad de volumen por unidad de tiempo, como galones por minuto), la carga total (expresada en pies del líquido que se bombea) y la velocidad de rotación a la cual trabaja la bomba (revoluciones por minuto).

El rendimiento o "comportamiento" de la bomba se presenta en forma de curvas, el cual está sujeta a una determinada tolerancia, donde se gráfica la relación entre la altura de elevación del líquido (carga total) con respecto a la capacidad de la bomba a una velocidad de rotación constante. De esta grafica se puede obtener para una capacidad conocida, los valores correspondientes de la potencia al freno, *NPSH requerido* y el valor de la eficiencia. La capacidad a la cual la bomba trabajará con mayor eficiencia se llama punto de máxima eficiencia. Estas curvas son proporcionadas por el fabricante para cada tipo y tamaño de bomba, el cual son obtenidas mediante ensayos realizados en un banco de pruebas donde poseen la instrumentación necesaria para medir el caudal, velocidad de giro, momento de torsión aplicado y la diferencia de presiones, todos corregidos al eje central de la bomba con la finalidad de poder predecir su comportamiento y obtener el mejor punto de operación para la condición de servicio especificada por el cliente.

Estas curvas se construyen realizando ensayos con agua fría como fluido estándar en las condiciones indicadas por las normas técnicas para ensayos de prueba, por ejemplo la norma ISO 2548 (*Centrifugal, mixed flow and axial pumps – Code for acceptance tests – Class C*) contiene un código para realizar los ensayos estándar de aceptación de bombas centrífugas, de flujo mixto o axial. El principal objetivo de estos ensayos es verificar que la bomba cumple con las garantías proporcionadas por el fabricante (PDVSA, 1997).

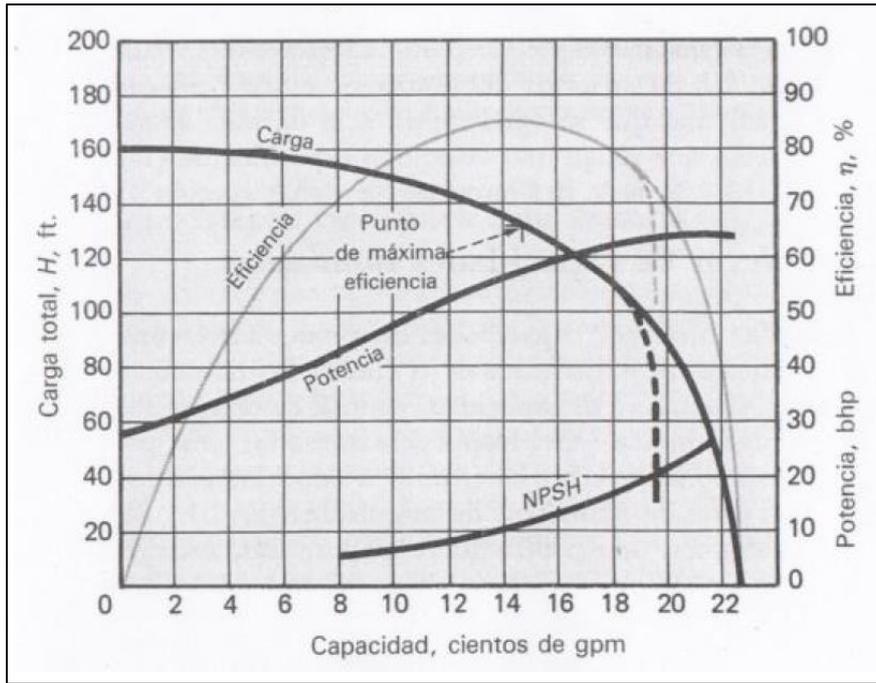


Figura 49: Característica de Rendimiento de una Bomba Centrífuga

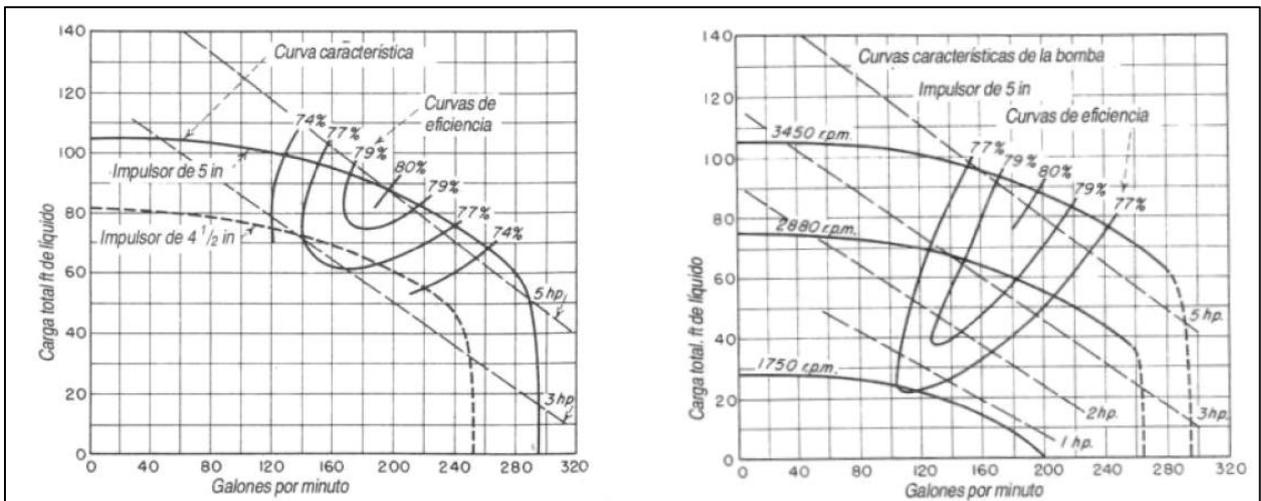


Figura 50: Ejemplos de Curvas Características de Bombas Centrífugas

2.28.1.7 Presión de Succión

La presión de succión es la cantidad de energía ejercida por la bomba para transportar un líquido que se encuentra almacenado desde un recipiente hasta el centro del impulsor. La presión de succión puede ser positiva o negativa dependiendo de la posición relativa del recipiente de almacenamiento. Su determinación se especifica a un nivel de referencia arbitrario de 0.6 m (2 ft) sobre el nivel de referencia del piso y está representada por la siguiente ecuación (PDVSA, 1996), (Viejo, 2003).

$$P_{succ} = P_s + \Delta P_{h-s} - \Delta P_{T-s} \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Donde:

P_{succ} = presión de succión del sistema, psig

P_s = presión absoluta sobre la superficie del líquido en el recipiente de succión ($P_{atm} + P_{man}$) ó ($P_{atm} - P_{vacío}$), psia

ΔP_{h-s} = caída de presión por altura de la tubería de succión, psi

ΔP_{T-s} = caída de presión por fricción total en la tubería de succión ($\square P + \square P_{acc}$), psi

ΔP_{acc} = caída de presión por fricción total de las válvulas y accesorios, psi

La caída de presión dinámica o energía cinética del fluido generalmente se considera despreciable en la ecuación 1.43, debido al valor mínimo que representa en comparación con las otras pérdidas de energía consideradas y más aún cuando los diámetros de la tubería de succión y de descarga son iguales (Guaycochea, 1992).

2.28.2 Sistema de Descarga

El objetivo de diseñar un sistema de tuberías es de asegurarse que se tenga el flujo deseado con el mínimo costo total. Las tuberías de descarga generalmente se diseñan con base a un balance económico de los costos iniciales de la tubería, accesorios, costos de operación y de mantenimiento, en contraste con el diseño de un sistema de succión.

Los factores principales para establecer un diámetro de descarga más económico son las características de la bomba, los requisitos del sistema y la ubicación del equipo. En el caso de situaciones cuando se requieran de un gran diámetro se suele realizar una comparación de los costos de manera más detallada para elegir entre los posibles diseños para la tubería. El diseño económico con base a estos factores implica reducir la pérdida de energía por fricción sobre la descarga de la bomba, es decir; que la trayectoria de la tubería desde la bomba hasta el recipiente de descarga debe ser lo más directa posible con el fin de mantener los cambios de dirección al mínimo y evitar los excesos de accesorios en el sistema.

Las tuberías de descarga se caracterizan en relación a la tubería de succión por la presencia de filtros, válvulas, accesorios o equipos con la finalidad de poder controlar y manipular el flujo hasta su punto de entrega. Su determinación es el resultado de considerar las presiones o caídas de presión involucradas en el sistema, tales como:

- La presión en el punto de entrega, este valor es independiente del flujo y es el punto donde se controla la presión a la cual está descargando la bomba (normalmente un

recipiente), o la presión atmosférica en el caso de tanques de almacenamientos atmosféricos.

- La presión estática, es el resultado de la diferencia de elevación entre el eje central o el nivel de referencia de la bomba y el nivel del líquido en el recipiente de descarga o el punto de descarga final de la tubería. Por lo tanto se considera la altura máxima del líquido para obtener el máximo cabezal de elevación requerido.
- La caída de presión debido a la presencia de válvulas y accesorios en el circuito de descarga, así como equipos de procesos, tales como: intercambiadores de calor, hornos, reactores, medidores de flujo, filtros, válvulas de control, entre otros.

2.28.2.1 Presión de Descarga

La presión de descarga es la cantidad de energía ejercida por la bomba para transportar y descargar un líquido en un recipiente a una determinada altura. Su determinación está representada por la siguiente ecuación (PDVSA, 1996) (Viejo, 2003):

$$P_{des} = P_d + \Delta P_{h-d} + \Delta P_{T-d} + \Delta P_{eq-d} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

Donde:

P_{des} = presión de descarga del sistema, psig

P_d = presión absoluta sobre la superficie del líquido en el recipiente de descarga ($P_{atm} + P_{man}$) ó ($P_{atm} - P_{vacío}$), psia

ΔP_{h-d} = caída de presión por altura en la tubería de descarga, psi

ΔP_{T-d} = caída de presión por fricción total en la tubería de descarga ($\Delta P + \Delta P_{acc}$), psi

ΔP_{acc} = caída de presión por fricción total de las válvulas y accesorios, psi

ΔP_{eq-d^*} = caída de presión por equipos presentes en el sistema de descarga, psi

Según Guaycochea, (1992). Al igual que la presión de succión se considera la energía cinética despreciable por los efectos insignificantes en relación a otras pérdidas y más aún cuando los diámetros de la tubería de succión y de descarga son iguales.

2.28.3 Equipo de Bombeo

Cuando se dispone de todos los datos del sistema tanto en la línea de succión como la de descarga es posible determinar la potencia hidráulica que desarrolla la bomba para transportar el líquido.

La potencia hidráulica es la cantidad de energía hidráulica que recibe un líquido a la salida de la bomba para ser transportado de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud, esta se calcula del mismo modo para todos los tipos de bombas y básicamente se originan a partir de un balance de energía mecánica entre los puntos de succión y descarga de la bomba (Viejo, 2003).

$$HP = \frac{P_{dif} \cdot Q}{1714} = \frac{H \cdot Q \cdot sp.gr}{3960}$$

(Ec. 2.27)

$$P_{dif} = P_{des} - P_{succ}$$

(Ec. 2.28)

Donde:

HP = potencia hidráulica entregada por la bomba, hp

H = carga diferencial o dinámica total de la bomba, ft

P_{dif} = presión diferencial de la bomba ($P_{des} - P_{succ}$), psi

P_{succ} = presión de succión de la bomba ($P_s + \Delta PT-s - \Delta Ph-s$), psig

P_{des} = presión de descarga de la bomba ($P_d + \Delta PT-d + \Delta Ph-d + \Delta Peq-d$), psig

Q = flujo volumétrico del líquido, gpm

$sp.gr.$ = gravedad específica del líquido, adimensional

La potencia al freno o potencia de flecha en el eje del motor de la bomba (BHP) se define como la cantidad de energía mecánica necesaria para transformar una cierta cantidad de fluido en energía de presión. Este valor generalmente suele ser proporcionado por el fabricante a través de las curvas características de la bomba o puede ser obtenido midiéndose directamente con un dinamómetro o bien indirectamente por un watt metro trifásico que indica la potencia eléctrica consumida por el motor.

La eficiencia total de una bomba se define como el consumo mínimo de energía necesaria para bombear un líquido a presión a través de toda la trayectoria del sistema de descarga, este valor total incluye las eficiencias mecánica, hidráulica y volumétrica y se relaciona entre la potencia entregada al fluido y la potencia recibida en el eje del motor de la bomba.

Se estima que los valores de la eficiencia varía en un intervalo de un 40 a 90% según la velocidad rotación específica del motor (Viejo, 2003).

$$n = \frac{\text{Potencia desarrollada (hidraulica)}}{\text{Potencia suministrada (mecánica)}} = \left(\frac{HP}{BHP} \right) \cdot 100\%$$

(Ec. 2.29)

Potencia entregada (hidráulica) < Potencia recibida (mecánica)

$$HP < BHP$$

Donde:

η = eficiencia total de la bomba, %

HP = potencia hidráulica entregada por la bomba, hp

BHP = potencia al freno en el eje del motor de la bomba, hp

Con la disponibilidad de estos datos es posible construir una curva de carga-capacidad del sistema para determinar el punto de operación o de máxima eficiencia de la bomba y posteriormente evaluar los resultados y verificar si es necesario realizar alguna modificación en el diseño del sistema. Posteriormente para poder realizar una oferta de una bomba apropiada al fabricante se le proporciona los siguientes datos:

- Las características del líquido; flujo, propiedades, temperaturas y presiones.
- Tipo de accionador (eléctrico o vapor) y requerimientos constructivos de la bomba en función del servicio que va realizar.
- Requisitos de los materiales los cuales estarán de acuerdo a las características fisicoquímicas del fluido.

Toda esta información suele reportarse en hojas de datos con el fin de brindarle al fabricante la facilidad y el orden de cualquier información que se precise.

El análisis de las etapas por las que pasa la adquisición de una bomba desde su gestación hasta su puesta en servicio, algunas corresponden al fabricante exclusivamente y otras al cliente; a partir de un punto existirá una semejanza o correspondencia entre ellos.

Fabricante	Cliente
Diseño de la bomba	Proceso
Cálculo de los elementos	Normas
Modelo	Diseño del sistema
Ensayos	Cálculo del sistema
Prototipos	Hoja de datos
Ensayos (para obtener características)	Especificaciones
Comercialización	Petición de oferta
Oferta	Selección
Fabricación	Activación
Pruebas	Inspecciones
Envío	Pruebas
Servicio Técnico	Autorización del envío
	Recepción
	Instalación
	Puesta en servicio
	Programa de mantenimiento

Figura 51: Sistema Típico de Bombeo

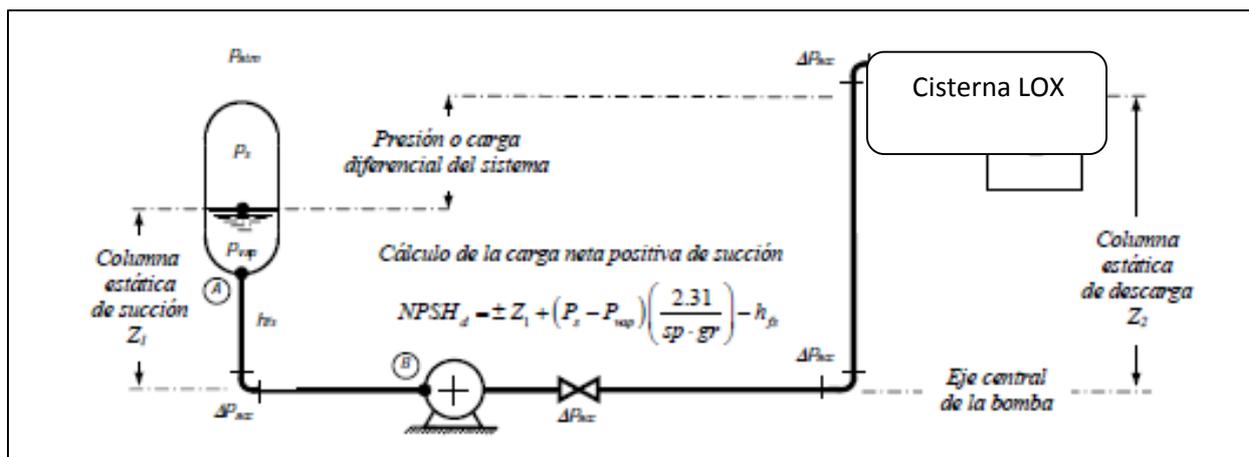


Figura 52: Carga Positiva Neta Para el Transporte de Fluidos

2.29 SISTEMAS DE CONTROL APACS-SIEMENS

Software APACS es un sistema de seguridad integrado, ofrece un control avanzado de acceso, monitoreo de alarmas, protección contra incendios, el vídeo digital, la funcionalidad de automatización de edificios. Además, APACS también proporciona intercambio de datos con los programas de recursos humanos de terceros, de Horarios y paquetes de gestión de visitantes.

En uso en algunos de los lugares más seguros de todo el mundo, incluidas las instalaciones militares, centrales nucleares e instalaciones de la industria de petróleo y gas, APACS ha demostrado una y otra vez. Diseñado para satisfacer las demandas de los sitios de alto volumen y alta seguridad, APACS es una solución flexible que puede crecer a partir de unas cuantas puertas a miles

2.29.1 Características

- Singular clave de licencia de software
- Información del controlador mejorado en diálogo de control
- Instalación mejorada y registro de errores
- Base de datos admite contraseñas de hasta 64 caracteres
- Mejora de la interfaz de base de datos
- Actualizaciones de bases de datos y copias de seguridad automáticas
- Nueva gestión de la conexión de base de datos. Base de datos Firebird ya no es compatible.
- Soporte para productos de vídeo Vicon, Verint, Pelco y Milestone
- Acceso Expiración, Vencimiento Notificador

- El soporte multi-máscara - lista completa de las máscaras de mensaje será analizado por cada incluso por lo que múltiples máscaras podría ejecutar reacciones en respuesta a un evento
- APACS tiene una estructura modular. Esta estructura modular especial proporciona seguridad y comodidad mediante la distribución de tareas a los distintos operadores. Sistemas de automatización de seguridad y de construcción se pueden monitorizar, controlar y configurar desde cualquier estación de trabajo, siempre con el permiso necesario. Ofrece a los clientes una gama completa de funcionalidad requerida. Muchos módulos individuales están disponibles para necesidades específicas. También el software APACS y hardware se pueden ampliar fácilmente añadiendo nuevos conductores e instalaciones de hardware o módulos de software más recientes. Arquitectura flexible se adapta a los requisitos de sistema autónomo a las soluciones empresariales
- APACS proporciona administrador, instalador e integrador de sistemas con herramientas, soluciones y tecnologías especiales para mejorar los procesos de instalación y mantenimiento, así como que le proporciona al operador convenientes herramientas útiles para simplificar las tareas diarias comunes.

3.1 MATERIAL

3.1.1 Población

- Población: El proceso de trasiego, supervisores y operadores de la Empresa Messer Gases del Perú S.A.

3.1.2 Muestra

- Muestra: El proceso de trasiego, un supervisor y un operador de la Empresa Messer Gases del Perú.

3.1.3 Unidad de Análisis

- Sistema de Trasiego: Tramo de tuberías donde se encuentran las válvulas de control y solenoides. Del tanque de almacenamiento LOX a la cisterna de despacho.

3.1.4 Material Requerido Para el Desarrollo de la Investigación:

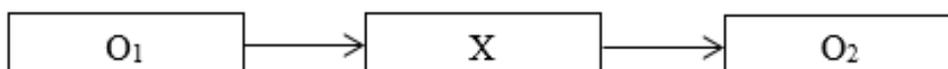
- Software "MATLAB"
- Pirómetro
- Termohigrometro

3.2 MÉTODO

3.2.1 Tipo de Investigación:

Investigación Aplicada

3.2.2 Diseño de Investigación



O₁: Pérdidas de producto sin el sistema de control automático

X: Proceso de trasiego

O₂: Pérdidas de producto con el sistema de control automático

3.2.3 Variables de Estudio y Operacionalización

3.2.3.1 Operacionalización de la Variable Independiente

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
Propuesta de Diseño de control automático del proceso de trasiego	La propuesta de diseño de control automático permite mejorar la eficiencia del proceso	El diseño de control automático acorde a las necesidades de los involucrados en el proceso de trasiego	Diseño de acuerdo a las necesidades del proceso de trasiego	----

3.2.3.2 Operacionalización de la Variable Dependiente

VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
Disminuir la pérdida de producto durante el proceso	Evitar pérdidas no deseadas durante el proceso de trasiego	Establecer en cuanto se logró disminuir las pérdidas del producto.	Simulación del proceso de trasiego mediante el software Matlab	----

3.2.4 Instrumentos de recolección de datos

Para el desarrollo de esta investigación nos avocaremos a los siguientes procedimientos:

- Entrevista con el Gerente Central de Operaciones

La información referida a las consideraciones técnicas basadas al proceso de manera manual, se obtendrá mediante el método de la entrevista personal al Gerente Central de Operaciones, el cual efectuará estimaciones, producto de las experiencias obtenidas en la modalidad de esta operación.

ENCUESTA

FECHA:

HORA:

1. DATOS GENERALES (Información de la Organización que responde el formulario)

1.1. Nombre completo de la Empresa u Organización:

1.2. Ubicación (Localidad – Departamento):

1.3. Nombre de la persona encuestada:

2. PREGUNTAS

2.1 ¿Cree usted que será eficiente para las operaciones que se desarrolla en planta y a la vez beneficioso para la compañía?

2.2 ¿Usted aprobaría la puesta en marcha de este proyecto?

Fuente: Propia

Para el desarrollo del presente proyecto, requerirá efectuar la recolección de información referida al estado actual operacional del proceso de trasiego en el área de despachos de Messer Gases del Perú S.A., dicha información será obtenida del Reporte Interno de Operaciones Productivas RO-ASU-01P, en donde se detalla los niveles de consumo del producto y las pérdidas efectuadas por las mismas. La presentación de los datos se hará por medio de tablas que permitirán establecer cuantitativamente los índices con los cuales nos permita efectuar análisis, permitiendo estimaciones mediante el uso de herramientas estadísticas.

3.2.4.1 Interpretación de Datos y Resultados

Para el análisis e interpretación de los datos obtenidos y procesados, se aplicará técnicas de tabulación y codificación, a fin de obtener información adecuada, la cual permita comprobar la hipótesis y obtener conclusiones.

Por tratarse de una investigación aplicada, es que los análisis conducirán a obtener como posibles resultados en función a las pérdidas de producto originadas por el purgado excesivo al operar manualmente y generara acciones en tiempos no oportunos.

Evaluamos el comportamiento del sistema con la finalidad de que dichas variables sean más significativas y reales para nuestro proyecto.

3.2.4.2 Característica del Sistema de Trasiego Operado de Manera Manual

Actualmente el sistema de distribución en toda su dimensión cuenta con unos controladores de presión neumáticos el cual me permite la acción de recirculación del producto y una serie de válvulas las cuales se tienen que operar de manera manual para iniciar la purificación de la red al desplazar el aire, humedad y partículas sólidas que puedan estar presentes. Consecuentemente se realizara el enfriamiento al pasar el flujo de oxígeno líquido desde el tanque estacionario de almacenamiento hacia el tanque transportable en el cual se obtendrá un valor de temperatura satisfactorio dentro del rango de temperatura de trabajo de la red y bomba para el uso de líquido específico y alcanzar una eficiencia adecuada, este cambio de temperatura se obtendrá en un tiempo determinado de respuesta en función a la temperatura ambiental y humedad relativa por la transferencia de calor que se genera.

El ciclo de enfriamiento (refrigeración de la red de trasiego) está conformado por el periodo de purificación de la red propiamente dicha, el enfriamiento en si hasta alcanzar niveles por muy debajo de cero grados (0 °C) a niveles criogénicos. Asimismo una vez obtenido el valor de las variables a valores deseados se realizara el proceso reversible de cierre de válvulas respectivamente y cerrar los controladores neumáticos evitando la recirculación para enviar el producto de

manera directa hacia el tanque transportable a una presión aproximada de 250 psi. Y con ello arrancar la bomba para uso de fluidos criogénicos respectiva del sistema.

Todo este mecanismo origina acciones en tiempos inoportunos pues no se logra que dichos eventos sean ejecutados en tiempo preestablecido generando la perdida excesiva del producto el cual conlleva a grandes pérdidas de dinero para la compañía.

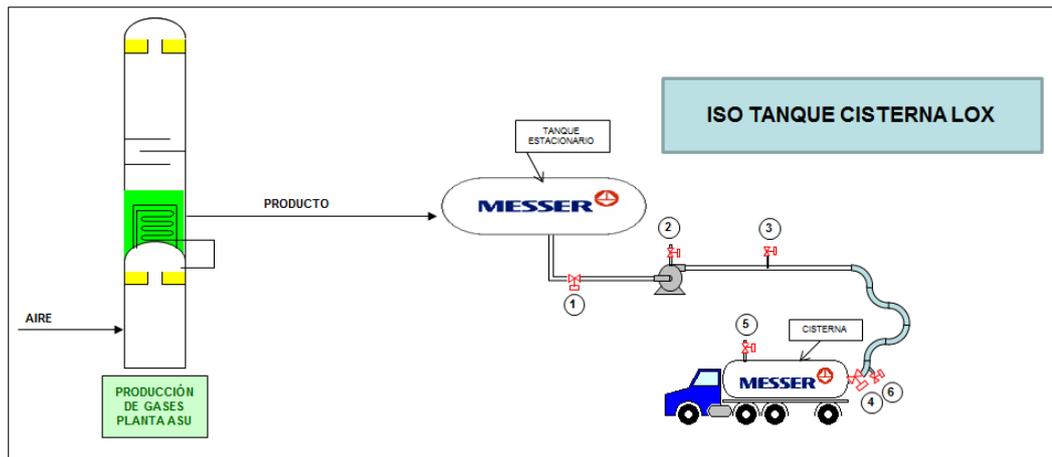


Figura 53: Producción de Gases en la Planta ASU

Se genera una orden de servicio por parte de la gerencia de operaciones, para realizar el trasiego de oxígeno líquido a una cantidad determinada hacia un cliente específico.

De manera manual, al inicio de la operación se genera el ciclo de enfriamiento de la red de trasiego, en el cual se demuestra que el nivel ha bajado en una mínima fracción pero a la vez muy representativa a consecuencia del enfriamiento del sistema por la purga excesiva ya que la operación es simplemente un mecanismo manual.

A continuación se describe dentro de la operación de trasiego el ciclo de enfriamiento y con ello el trasiego de oxígeno líquido demostrando el grado de pérdidas significativas de nuestro producto.

Como se puede apreciar el tanque de almacenamiento de LOX. Se encuentra a un nivel inicial equivalente a un porcentaje de su capacidad y a una presión de 20 psi aproximadamente.



Figura 54: Tanque de almacenamiento LOX

3.2.4.2.1 Ciclo de Enfriamiento:

El objetivo principal es demostrar que al realizar la operación de trasiego de manera manual obtenemos un ciclo de enfriamiento prolongado y a la vez enviando mucho oxígeno en estado líquido a la atmosfera por consecuencia de no actuar de manera eficiente por parte del operador, y resultados de que ha reducido una cantidad de producto en nuestro stock.

En este punto realizaremos en campo el muestreo respectivo para determinar el comportamiento de la temperatura a niveles criogénicos en la red de trasiego y determinar el tiempo necesario a alcanzar el ciclo de enfriamiento.

Muestreo de temperatura obtenido a través de ensayos realizados en campo en las mejores condiciones climatológicas, es decir a un clima sometido a 23 °C de temperatura y una humedad relativa de 72% como datos ambientales.

- Los instrumentos de medición que se utilizaron son:
 - 01 Pirómetro (thermometer infrared) FLUKE
 - 01 Termómetro e Higrómetro
 - 01 Cronometro



Figura 55: Toma de Datos de Nuestra Operación

- En la siguiente figura se muestra la característica del comportamiento del sistema en estado estacionario:

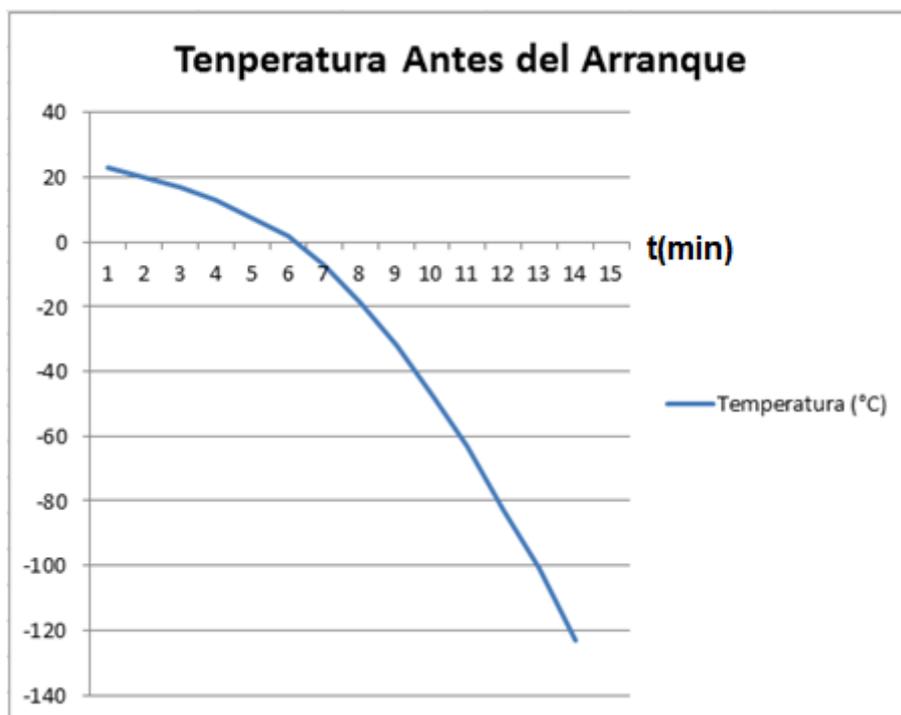


Figura 56: Temperatura Vs Tiempo

Como se puede observar el ciclo de enfriamiento inicia en la purificación de la red a consecuencia del desplazamiento del aire que realiza el oxígeno en estado gaseoso inicialmente, el cual se ha considerado por un periodo de unos 5 min. Equivalentes al 30% para nuestro ciclo. A medida que se va avanzando se genera un enfriamiento a un grado cada vez menor por debajo de cero grados (0°C) hasta alcanzar temperatura a niveles criogénicos a un periodo equivalente entre los 12 min. a 14 min.

Pues esto origina que en la red de trasiego se obtenga un flujo de oxígeno en estado líquido. Por lo que se deben cerrar todas las válvulas de purgado para iniciar el arranque del sistema.

3.2.4.3 Resultados Obtenidos Desde el Sistema de Control:

Durante las pruebas de muestreo realizadas se determinó el ciclo de enfriamiento, paralelo a ello se muestra un descenso en el nivel a consecuencia del enfriamiento. Dicho descenso del nivel en el tanque de almacenamiento es exagerado por el excesivo purgado obteniendo pérdidas numerosas del producto.

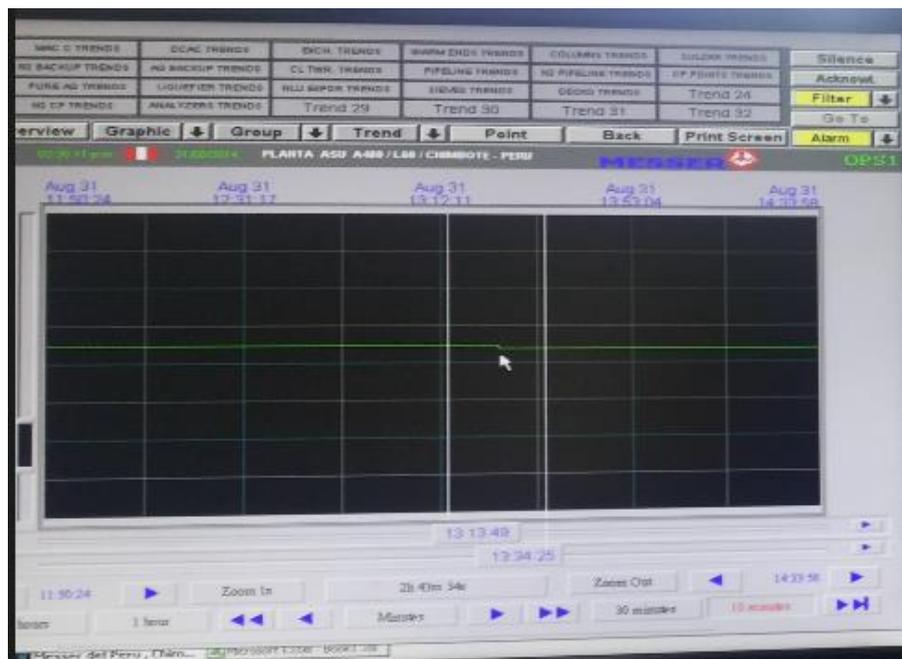


Figura 57: Resultados Desde el Sistema de Control

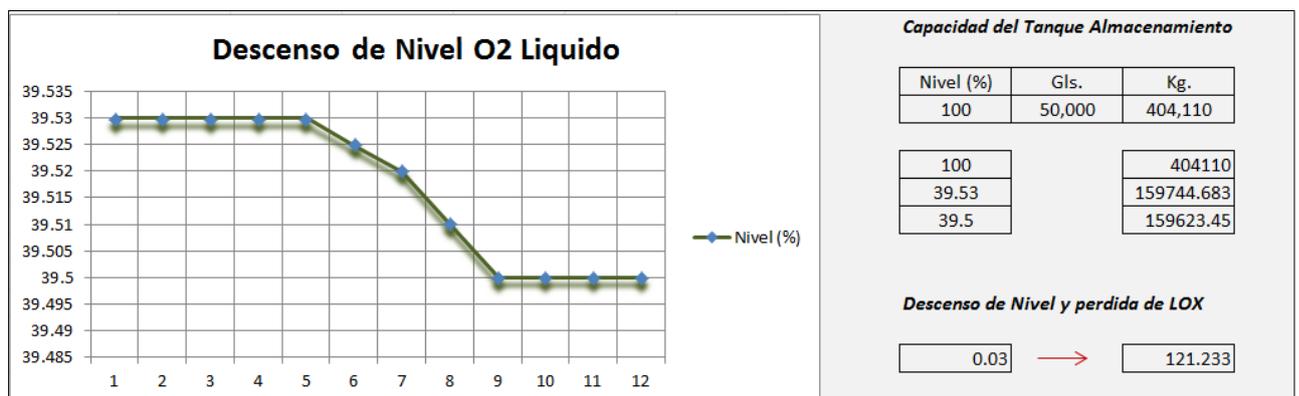


Figura 58: Resultados del Sistema de Control de Procesos el Cual Registra los Niveles en El

Obtenidas del Reporte Interno de Operaciones Productivas RO-ASU-01P. Como se observa en las tablas el nivel ha decrecido de 39.53% a 39.50% de nivel (0.03%) que equivale a 121.23 kg de oxígeno líquido el cual es considerado pérdida correspondiente a realizar 01 operación de trasiego durante el ciclo de enfriamiento.

Realizamos una estimación para un periodo de operación diaria, considerando que se realizan aproximadamente 10 trasiegos que conllevan a una pérdida equivalente de 1.0 a 1.2 Toneladas en pérdida de producto.

A continuación se presenta la estimación de pérdidas en relación a costos, determinado para un periodo equivalente de un año.

Estimación de Pérdidas	Pérdida de Oxígeno Líquido		
	Kg.		Ton
Generadas por Operación	121.23	121.23	0.12
Generadas por Día (considerando 10 operaciones)	121.23	1212.30	1.21
Generadas por Semana	1212.30	8486.10	8.49
Generadas a un Mes (considerando 30 días)	1212.30	36369.00	36.37

Tabla 6: Pérdidas de Oxígeno Líquido Originadas a un Mes de Operación

Costos	Oxígeno Líquido	
Oxígeno en Estado Líquido - a granel por Tonelada (1000 Kg.)	Dólares (\$.)	Soles (S/.)
	180.00	514.80

Tabla 7: Muestra los Costos de Oxígeno por Cada 1000 Kg

Estimación de Pérdidas en Función a Costos	Pérdida de Oxígeno Líquido	
	Dólares (\$)	Soles (S/.)
Generadas por Operación	21.78	62.29
Generadas por Día (considerando 10 operaciones)	218.21	624.09
Generadas por Semana	1527.50	4,368.64
Generadas a un Mes (considerando 30 días)	6546.42	18,722.76
Generadas a un Año (considerando 12 meses)	78557.04	224,673.13

Tabla 8: Muestra las Pérdidas a un Año de Operación

3.2.5 Procedimientos y Análisis de Datos

3.2.5.1 Procedimientos:

En este ítem se aborda la importancia de la filosofía de proyectos de ingeniería en la industria, partiendo de una Ingeniería Básica. Además, se presentan las metodologías y criterios de manera general que son empleadas para el dimensionamiento, construcción e integración de señales dentro de un sistema de control de procesos Apacs – Siemens para la automatización del proceso de trasiego de oxígeno líquido.

3.2.5.1.1 Desarrollo del Proceso de Trasiego Automático

3.2.5.1.1.1 Generalidades

Las plantas industriales como hornos, intercambiadores de calor, calderas, columnas de destilación, concentradoras (extracción de metales), tratamiento de agua, lixiviación, extracción por solventes, cámaras refrigerantes, etc., son instalaciones orientadas a la fabricación o a la obtención de productos, formado por un conjunto de equipos y máquinas que realizan la transformación de las materias primas en productos terminados. Entre estos procesos industriales que intervienen en las plantas industriales más comunes tenemos: flujo de fluidos (gases y líquidos), transporte de sólidos, reducción de tamaño, presión de aire en tanques, nivel de líquidos y sólidos en tanques o reservorios, temperatura de hornos y líquidos en tanques, concentración en líquidos, mezclas de tanques, molinos, pulverizadores, celdas de flotación, hidrociclones, etc., estos procesos requieren de operaciones comunes que se efectúen sobre el proceso con el fin de obtener un producto.

El control en procesos de transferencia de líquidos criogénicos (trasiego): Desde tanques de almacenamiento a tanques transportables, es hoy en día de gran inquietud en la industria pues presenta un gran diferencial respecto a los ratios de producción respecto a los ratios obtenidos probablemente una de las operaciones empleadas y con mayor índice de pérdidas por parte de las técnicas empleadas para dicha transferencia.

Se empezó a desarrollar y aplicar un sistema con estrategias de control más acordes a un modelo desarrollado y aplicativo.

Esta tesis se centra en el diseño de un sistema de trasiego automático, este proceso es de naturaleza no lineal y variante en tiempo e influye en muchos procesos industriales, su operación es de manera notable para la obtención de una adecuada transferencia reduciendo notablemente el índice de pérdidas (por ejemplo en plantas de líquidos criogénicos por destilación, refinerías, etc.)

3.2.5.1.1.2 Descripción del Proceso

El control en un sistema de trasiego por lo regular es crítico en procesos industriales en los que es necesidad de transferir líquido de naturaleza criogénica, se debe considerar un comportamiento no lineal bajo las condiciones de operación y de su naturaleza variante en el tiempo (estas variaciones se presentan en un rango pequeño en magnitudes de su dinámica).

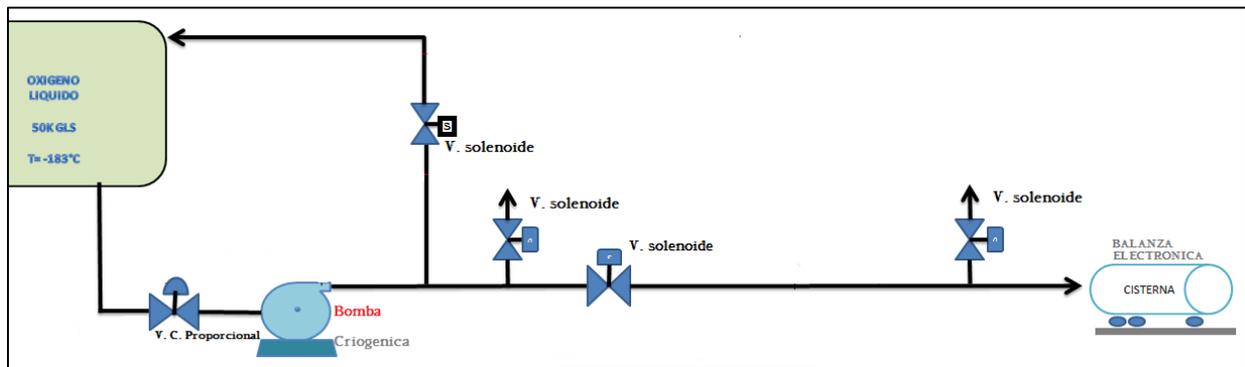


Figura 59: Vista del Sistema de Trasiego de Oxígeno Líquido

En el proceso se controla la temperatura del sistema tomando como núcleo la bomba para poder realizar las operaciones de trasiego requieren de una bomba de transferencia. Para el uso de fluidos criogénicos dentro de la red de trasiego mediante una tubería de 1 1/2" regulado por una válvula neumática proporcional, el aire es suministrado por una línea de aire seco de instrumentación proveniente de un subsistema de la línea de proceso de destilación de gases del aire, el cual opera a una presión equivalente a 85psi. El flujo de oxígeno en estado líquido que pasa a través de la red de trasiego es considerado directamente proporcional a cambios de temperatura producida en la red propiamente dicha, pues esta debe ser controlada.

En el sistema de trasiego encontramos que la característica del oxígeno como fluido es fundamental ya que su característica principal se basa en su estado térmico a la que se encuentra, por ello es de

suma importancia para una adecuada transferencia un sistema de trasiego en particular para esta aplicación.

La red de trasiego ha sido diseñado con un factor importante de transferencia de calor por convección, también se consideró la transferencia de calor en la pared del tubo, al ambiente y la capa de aislante que recubre la tubería.

Todo ello contribuye a una mejora en todo el sistema que va acorde a las configuraciones de diseño que posteriormente se va a plantear en el estudio del proyecto.

En la Figura 60 se muestra el diagrama de instrumentación PI&D del sistema de trasiego automático donde encontramos los instrumentos y equipos, así como su interconexión mediante tuberías, sistema eléctrico, etc.

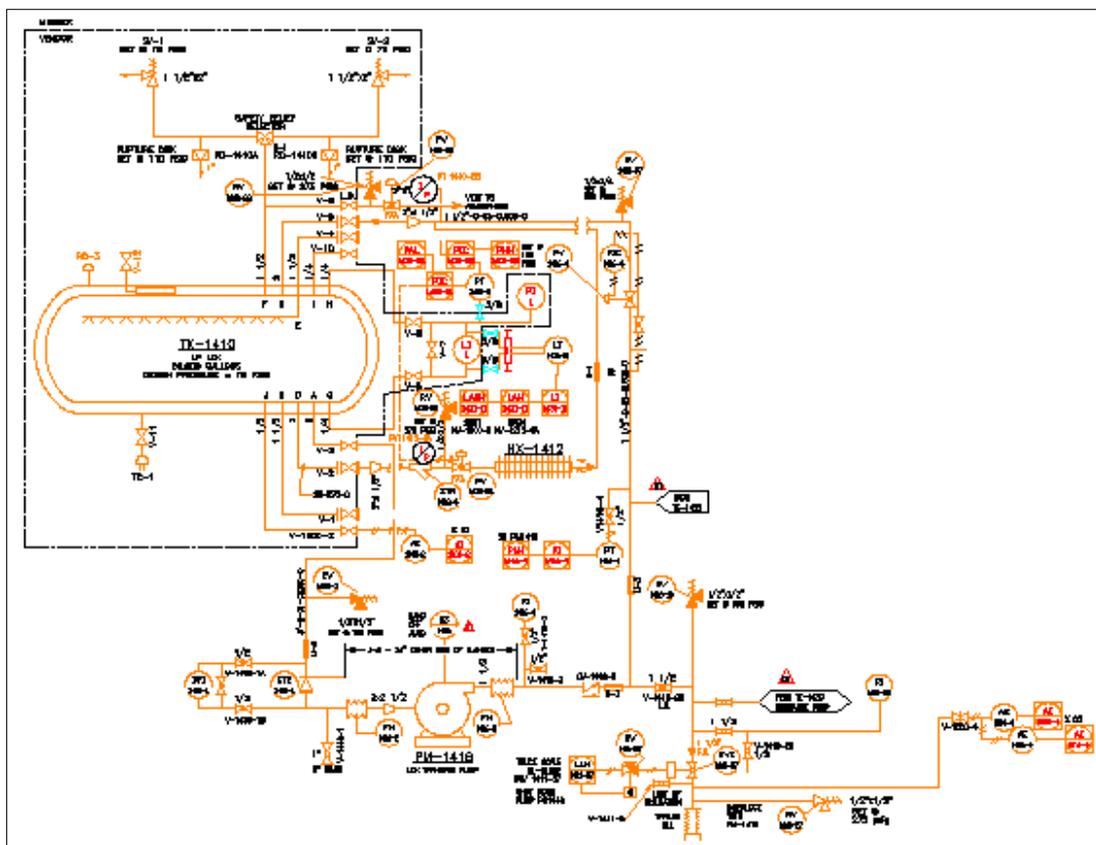


Figura 60: Diagrama de Instrumentación del Proceso - PI&D

Se inicia la operación de trasiego a través de la válvula proporcional PV-301 con apertura del 30% el cual me generara un flujo deseado el cual cumple el objetivo de purificar toda la red, una vez que se obtiene pureza equivalente a 99% O₂ en la red, el cual es obtenido a través de un analizador Teledyne para esta aplicación. Se activara un secuencia de recirculación del flujo que dependerá de la temperatura que se mide constantemente en la red a ubicación de la bomba criogénica, pues dependiendo del flujo de oxígeno este manipulara la posición de la válvula proporcional como elemento

final de control por lo que el flujo de oxígeno continúa su curso a través de dicha válvula hasta obtener una apertura máxima, el cual será proporcional a alcanzar el punto de ebullición del O₂ líquido en la red. Dado que existe una relación lineal con el flujo másico de oxígeno.

3.2.5.1.1.3 Caracterización del Proceso de Trasiego Automático

Las características operativas, estructurales permiten clasificar y definir sus cualidades en relación a su aplicación. La finalidad del sistema de trasiego automático es la realización de ensayos aplicados a la investigación o servicios a terceros, por lo tanto no es de interés la capacidad de producción de líquidos criogénicos sino más bien a la operatividad del sistema en función a la transferencia del producto reduciendo de manera notable las pérdidas.

3.2.5.1.1.4 Características Generales del Proceso de Trasiego Automático

Las características generales son:

- Proceso: Red de Trasiego.
- Flujo Transferencia: 136 gpm.
- Temperatura de fluido: -183°C
- Equipamiento:
 - Válvulas ON / OFF
 - Analizador Teledyne 3010MA - % O₂
 - Elemento primario : Sensor de Temperatura (RTD)
 - Elemento final : Válvula de control PV (3 a 15 psi)
Con Posicionador de Válvula 3582i.
 - Bomba Centrífuga para uso criogénico
 - Sistema Apacs – siemens (Integración de señales al sistema DCS)
- Visualización
 - Visualización: Supervisión Wonderware Process Suite (Visión)
 - Sala de Control.

3.2.5.1.1.5 Características Técnicas de los Equipos del Proceso de Trasiego Automático

Se presentan los equipos que involucran el proceso de trasiego automático en ellos se expone sus características más resaltantes de cada uno, que en conjunto es un sistema eficiente y tiene por finalidad reducir pérdidas de producto en la operación de trasiego a consecuencia del purgado y mala operación de válvulas.

Para conocer específicamente el proceso de trasiego automático mencionaremos las características técnicas de sus componentes industriales:

3.2.5.1.1.5.1 Válvula de Control:

Es un actuador que permite variar el flujo de oxígeno líquido a manera que la temperatura va bajando en la red de trasiego hasta alcanzar niveles criogénicos de manera consecuente. La válvula es neumática, lineal y consta de un posicionador neumático lineal.

Características Técnicas de la Válvula de control

Modelo/ Marca	Fisher_ 657
Actuador	Diafragma - Acción directa

Tabla 9: Características Técnicas de la Válvula de Control



Figura 61: Vista de la Válvula de Control

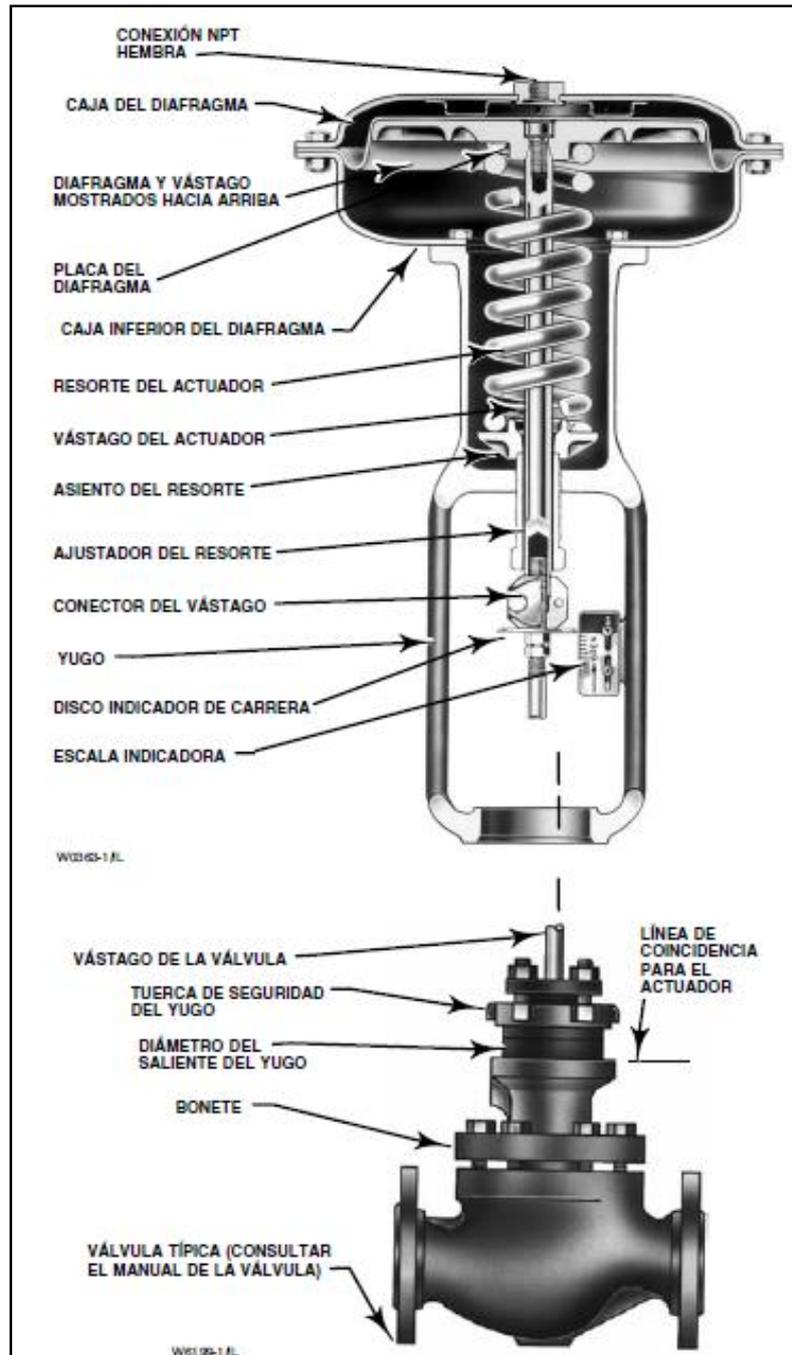


Figura 62: Componentes de Montaje del Actuador- Válvula

3.2.5.1.1.5.2 El Posicionador de Válvula Neumático 3582i:

Se usan en conjunto de la válvula de control de diafragma y de vástago deslizante.

Los posicionadores de válvula neumáticos reciben una señal de entrada neumática desde un dispositivo de control y modulan la presión de suministro al actuador de la válvula de control.

El posicionador ajusta la presión de suministro del actuador para mantener la posición del vástago de la válvula proporcional a la señal de entrada neumática.



Figura 63: Vista del Posicionador

Características Técnicas del Posicionador Neumático

Marca	Metso 3582i
Señal de entrada	0,2 a 1,0 bar (3 a 15 psig), _ 0,4 a 2,0 bar (6 a 30 psig) o _ rango dividido, Corriente de 4 a 20 mA
Señal de salida	la presión neumática que requiera el actuador, hasta un máximo del 95%
Acción:	reversible en campo entre _ directa e inversa dentro del posicionador de válvula Neumático
Fluido de suministro:	Aire, aire instrumentación.
Máximo consumo de aire en estado estable	<i>Suministro de 1,4 bar (20 psig): 0,38 m3/hr (14.0 scfh) normales</i> <i>Suministro de 2,0 bar (30 psig): 0,48 m3/hr (18.0 scfh) normales</i> <i>Suministro de 2,4 bar (35 psig): 0,54 m3/hr normales (20.0 scfh)</i>
Rendimiento	<i>Linealidad independiente: ±1% del span de la señal de salida</i>
Límites de temperatura ambiental operativa Construcción normal:	-40 a +71 °C
Leva	Lineal
Peso aproximado	2,5 kg (5.5 lb)

Tabla 10: Características Técnicas del Posicionador Neumático

3.2.5.1.1.5.3 Sensor de Temperatura PT-1000

Los RTDs más usados son los que emplean platino como sensor cuya resistencia cambia con la temperatura. Entre sus ventajas, destacan por tener mejor linealidad, más rapidez y mayor margen de temperatura [-200°C, 800°C]

La nomenclatura del sensor se compone de material, resistencia en Ohmios a 0°C y clase del sensor de temperatura que expresa la precisión de la misma. Los materiales empleados para la construcción de sensores RTD suelen ser conductores tales como el cobre, el níquel o el platino.

Parámetro	Platino (Pt)	Cobre (Cu)	Níquel (Ni)	Molibdeno (Mo)
Resistividad ($\mu\Omega cm$)	10.6	1.673	6.844	5.7
$\alpha(\Omega/\Omega/K)$	0.00385	0.0043	0.00681	0.003786
$R_0(\Omega)$	25, 50, 100, 200	10	50, 100, 120	100, 200, 500
margen ($^{\circ}C$)	-200 a +850	-200 a +260	-80 a +230	-200 a +200

Tabla 11: Propiedades de los Conductores

De todos ellos es el platino el que ofrece mejores prestaciones, como:

La PT100 varía 38,5 Ohm cada 100 $^{\circ}C$ y la PT1000 varía 385 Ohm cada 100 $^{\circ}C$. La sensibilidad de la RTD de platino es muy constante a lo largo de todo el rango de temperaturas que son capaces de medir, presentando, por ello una gran linealidad.

El siguiente gráfico muestra una curva real de la relación resistencia – temperatura:

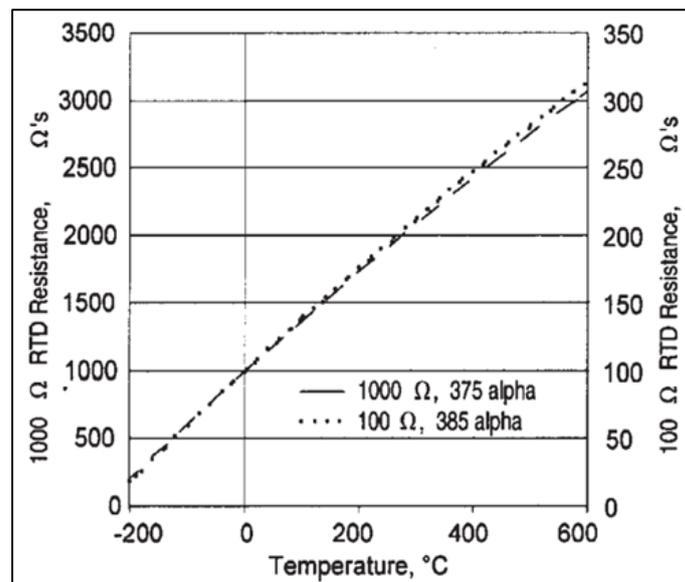


Figura 64: Resistencia Vs Temperatura

La longitud del cable influye significativamente en la medida, por lo que es necesario tenerlo en cuenta. Cuando se quieren descontar los efectos del cable, se usan sondas de 3 o 4 hilos con compensación. La sensibilidad es baja, obligando a montar circuitos electrónicos para medir la temperatura (típicamente un puente de wheatstone amplificado). Hay que prever el efecto de auto calentamiento por efecto de la corriente que circula por el sensor.



Figura 65: Vista de la Termocupla - Sensor de Temperatura

3.2.5.1.1.5.4 La Bomba Criogénica de Trasiego:

Equipo rotativo que posibilita la transferencia de producto criogénico (LOX) desde un tanque estacionario de baja presión (20psig) hacia un tanque transportable a través de una red de trasiego.

Características Técnicas de la Bomba Criogénica - Motor Eléctrico

BOMBA CRIOGÉNICA				
BOMBA DE OXÍGENO LÍQUIDO (TK DE 50000GL)		MOTOR ELÉCTRICO		
MARCA :	ACD Inc.	MARCA :	U.S. Elec. Motors	
TIPO :	Centrifuga	FR :	364TC	
MODEL :	TC 50	TYPE :	FTC	
ASSY P/N :	3408470 - XXXXX	ENCL :	TE	
PUMP SIZE :	1.5 X 2.5 X 10	PH :	3	
SPEED :	3900 RPM	MAX AMB. :	40 °C	
IMPLR. DIA. :	9.7 IN	ID # :	B11 98122338-001R- O4	
S.O. NO. :	89113	INSUL CLASS :	F	
SERIAL NO. :	99891133 / 73827	DUTY :	CONT	
CASE MAT'L :	BRONZE		HIGH VOLTAGE	LOW VOLTAGE
HYDRO TEST :	650 PSIG	HP :	60	60
DUTY :	INT	RPM :	3565	2950
SERVICE :	LO2	VOLTS :	460	380
CAPACITY :	132 GPM	FL AMPS :	69	85
HEAD :	520 FT	SF AMPS :	79	
POWER :	37 HP	SF :	1.15	1.0
NPSHR :	2.3 FT	DESIGN :	B	
SUCT. PRESS. :	20 PSIG	CODE	A	A
DISCH. PRESS. :	280 PSIG	NEMA NOM EFF. :	93.0	91.0
MAX. SUCT. PRESS. :	100 PSIG	NOM PF :	88.1	87.9
DATE OF MFG. :	sep-99	GUARANTEED EFF. :	91.7	89.5
		MAX KVAR :	12.1	9.7

Tabla 12: Características Técnicas de la Bomba Criogénica - Motor Eléctrico

Aplicaciones para Fluidos:

- Nitrogen (LIN)
- Oxygen (LOX)
- Argon (LAR)
- Methane (LNG)

Vista real de la Bomba Criogénica centrífuga



Figura 66: Vista real de la Bomba Criogénica

Muestra del acoplamiento de la Bomba Criogénica a un motor respectivo

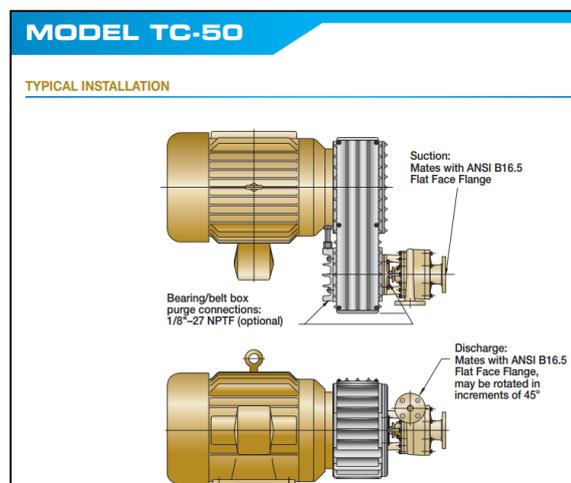


Figura 67: Acoplamiento e Instalación

Curva característica de la Bomba Criogénica

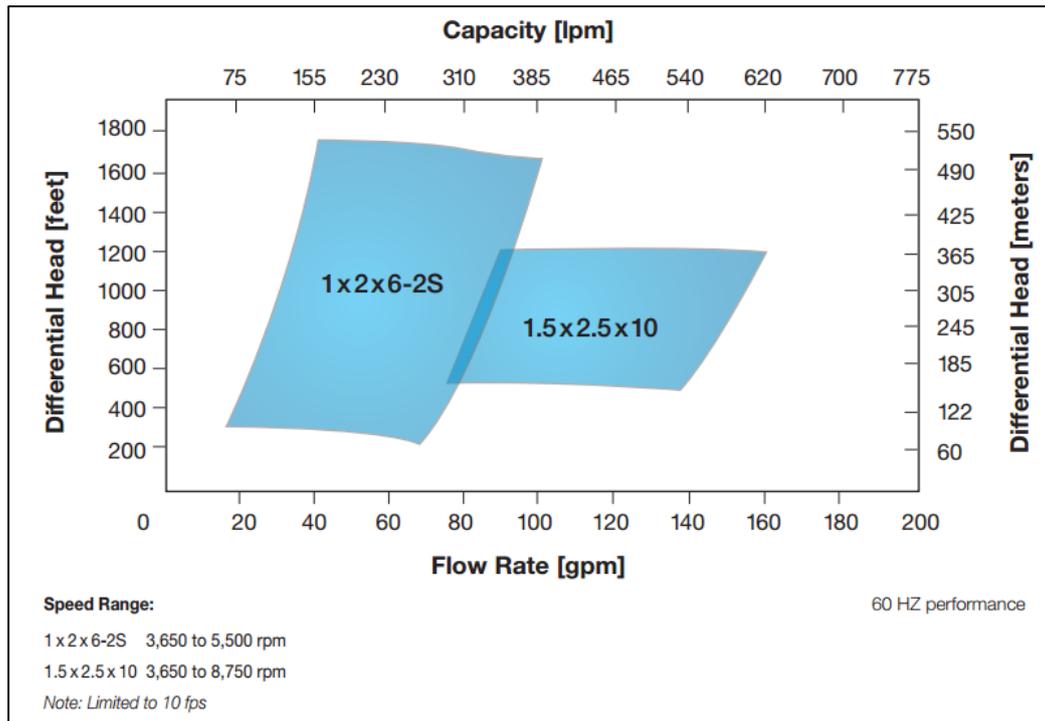


Figura 68: Curva Característica de la Bomba Criogénica

3.2.5.1.1.5.5 Los Reguladores de Presión:

Tienen la función de mantener constante la presión de alimentación del aire a los equipos. Se tiene también manómetro y filtro.

En la siguiente tabla se ofrecen las características técnicas del regulador de presión de aire.

Características Técnicas de los Reguladores de Presión de Aire

Marca	Swagelok
Modelo	Type 5110P
Rango	0-30 psi
Alimentación de aire	300 psi máx.

Tabla 13: Técnicas de los Reguladores de Presión de Aire

3.2.5.1.1.5.6 Válvulas Solenoides ASCO:

Registro de selección de las Válvulas Solenoides ASCO:

- SERIES: 8202G/H

Se especifica la válvula que se está buscando en las tablas provistas. Dichas tablas brindan información sobre las siguientes características con el fin de ayudar a la correcta selección:

- Diámetro de conexión (en pulgadas).
- Orificio interno (en pulgadas).
- Cv Factor de Flujo (adimensional).
- Presión de operación diferencial (en PSI).
- Máxima temperatura del fluido (en °C).
- Modelo.
- Material del cuerpo.
- Material de sellos e internos.
- Voltaje de la bobina.
- Potencia eléctrica.
- Aprobaciones.

Características Generales de Válvulas Solenoides 2/2

Diámetro de conexión (in)	Orificio Interno (in)	CV Factor de Flujo	Presión de operación diferencial (PSI)				Máxima temperatura del fluido (°F) ①	Modelo	Material del cuerpo	Material de sellos e internos	Voltaje de la bobina	Potencia eléctrica (W)
			min.	max.								
				aire	agua	aceite						
2/2 Normalmente Cerrada												
1/8	1/8	0.35	0	130	110	95	180	8262H002	BR	NBR	24/DC	10.6
1/2	5/8	4	0	150	150	-	180	8210G094	BR	NBR	120/60,110/50	10.1

Tabla 14: Características Generales de Válvulas Solenoides 2/2

- Aplicaciones y Correcta Selección de Válvulas Solenoides

Una Válvula Solenoide, es un dispositivo electro-mecánico que se energiza o des-energiza para abrir o cerrar un orificio de paso y permitir o bloquear el flujo de aire, agua, aceite, gases inertes, combustibles, vapor, etc. Este dispositivo está diseñado para el control unidireccional (un solo sentido) y es sumamente práctico y eficiente para el control de fluidos limpios, ya que su instalación y mantenimiento son sumamente sencillos si lo comparamos con otro tipo de válvula, como mariposa, cuchilla o de bola.

Las limitantes de una Válvula Solenoide radican en que generalmente no exceden las 3" de conexión y por su tipo de construcción interna, no puede manejar fluidos altamente viscosos, con sólidos en suspensión o que no sean compatibles con los materiales de construcción. La selección apropiada, inicia considerando qué tipo de operación es más conveniente para su aplicación, las válvulas de Acción directa abren o cierran por influencia directa del campo magnético sobre el núcleo móvil, es decir, solo es necesario energizar la bobina para que la válvula funcione; aquellas de Acción Pilotada, ideales para presiones y/o flujos mayores, sustituyen la acción directa apoyándose en la presión de la línea para abrir orificios más grandes, manteniendo el tamaño del solenoide pequeño.

Las válvulas Normalmente Cerradas (N.C.), abren cuando son energizadas y cierran cuando no; las válvulas Normalmente Abiertas (N.O o N.A.) actúan exactamente al contrario. Las válvulas de Dos Vías, tienen una conexión de entrada y una de salida, pueden ser normalmente abiertas o normalmente cerradas.

- Vías 2 Posiciones Servicios Generales

Válvulas Solenoides 2 vías 2 posiciones (2/2), servicios generales para controlar el paso de un fluido en un sistema.

- *Control de agua, aire, aceites ligeros y fluidos no agresivos.*
- *Operación Normalmente Cerrada (abre cuando se energiza) o Normalmente Abierta (cierra cuando se energiza).*
- *Diámetros de conexión desde 1/8" hasta 3" NPT.*



Figura 69: Vista de Válvulas Solenoides de 2 Vías, 2 Posiciones

Diámetro de conexión (in)	Orificio Interno (in)	CV Factor de Flujo	Presión de operación diferencial (PSI)				Max. temp. del fluido (°F) ①	Modelo	Material del cuerpo	Material de sellos e internos	Voltaje de la bobina	Potencia eléctrica (W)	
			min.	max.									
				aire	agua	aceite							
2/2 Normalmente Cerrada													
1 1/4	1 1/8	15	0	150	125	125	180	8210G055	BR	NBR	120/60	16.1	
		15	5	150	150	100	180	8210G008	BR	NBR	120/60,110/50	6.1	
		15	5	150	150	100	180	EF8210G008	BR	NBR	120/60,110/50	6.1	
		15	5	125	125	125	150	8210G008	BR	NBR	24/DC	11.6	
	1 5/8	32	0	25	-	-	125	8215B060	AL	NBR	120/60,110/50	15.4	
1 1/2	1 1/4	22.5	0	150	125	125	180	8210G056	BR	NBR	120/60	16.1	
		22.5	0	150	125	125	180	EF8210G056	BR	NBR	120/60	16.1	
		22.5	5	150	150	100	180	8210G022	BR	NBR	120/60,110/50	6.1	
		22.5	5	150	150	100	180	8210G022	BR	NBR	240/60,220/50	6.1	
		22.5	5	150	150	100	180	8210G022	BR	NBR	24/60	6.1	
		22.5	5	150	150	100	180	EF8210G022	BR	NBR	120/60,110/50	6.1	
			22.5	5	125	125	125	150	8210G022	BR	NBR	24/DC	11.6
		1 5/8	35	0	25	-	-	125	8215B070	AL	NBR	120/60,110/50	15.4
		35	0	25	-	-	77	8215B070	AL	NBR	24/DC	14.9	
2	1 3/4	43	5	150	125	90	180	8210G100	BR	NBR	120/60,110/50	6.1	
		43	5	150	125	90	180	EF8210G100	BR	NBR	120/60,110/50	6.1	
		43	5	150	125	90	180	8210G100	BR	NBR	240/60,220/50	6.1	
		43	5	50	50	50	150	8210G100	BR	NBR	24/DC	11.6	
	2 3/32	60	0	25	-	-	125	8215B080	AL	NBR	120/60,110/50	15.4	
2 1/2	1 3/4	45	5	150	125	90	180	8210G101	BR	NBR	120/60,110/50	6.1	

Tabla 15: Servicio General - 2/2 Normalmente Cerrada 1 1/4" - 2 1/2"

2/2 Normalmente Abierta												
1/4	3/32	0.21	0	275	230	180	180	8262H261	BR	NBR	120/60,110/50	10.1
	1/8	0.35	0	160	145	125	180	8262H262	BR	NBR	120/60,110/50	10.1
3/8	5/8	3	0	150	150	125	180	8210G033	BR	NBR	120/60,110/50	10.1
		3	0	150	150	125	180	EF8210G033	BR	NBR	120/60,110/50	10.1
1/2	5/8	4	0	150	150	125	180	8210G034	BR	NBR	120/60,110/50	10.1
		4	0	150	150	125	180	EF8210G034	BR	NBR	120/60,110/50	10.1
		4	0	150	150	125	180	8210G034	BR	NBR	240/60,220/50	10.1
		4	0	125	125	80	150	8210G034	BR	NBR	24/DC	11.6
		3/4	4	5	250	200	200	180	8210G012	BR	NBR	120/60,110/50
3/4	3/4	4	0	125	-	-	125	8215G023	AL	NBR	120/60,110/50	10.1
		4.6	0	125	-	-	125	8215G033	AL	NBR	120/60,110/50	10.1
		4.6	0	125	-	-	125	EF8215G033	AL	NBR	120/60,110/50	10.1
		5.5	0	2	2	-	180	8030G083	BR	NBR	120/60,110/50	10.1
		5.5	0	150	150	125	180	8210G035	BR	NBR	120/60,110/50	10.1
		5.5	0	150	150	125	180	8210G035	BR	NBR	240/60,220/50	10.1
		5.5	0	150	150	125	180	EF8210G035	BR	NBR	120/60,110/50	10.1
		5.5	0	125	125	80	150	8210G035	BR	NBR	24/DC	11.6
1	1	13	0	125	125	125	180	8210B057	BR	NBR	120/60,110/50	20
		13	5	150	150	125	180	8210G014	BR	NBR	120/60	16.1
		13	5	150	150	125	180	EF8210G014	BR	NBR	120/60	16.1
		13	5	150	150	125	180	8210G014	BR	NBR	240/60	16.1
		1 5/8	22	0	25	-	-	125	8215C053	AL	NBR	120/60,110/50
1 1/4	1 5/8	33	0	25	-	-	125	8215C063	AL	NBR	120/60,110/50	15.4
1 1/2	1 1/4	22.5	5	150	150	125	180	8210G032	BR	NBR	120/60	16.1
2	1 3/4	43	5	125	125	125	180	8210G103	BR	NBR	120/60	16.1
2 1/2	1 3/4	45	5	125	125	125	180	8210G104	BR	NBR	120/60	16.1

Tabla 16: Servicio General - 2/2 Normalmente Abierta 1/4"- 2 1/2"

3.2.5.1.1.5.7 El Actuador Neumático Rotativo POSITORK

Actuador Neumático.



Figura 70: Actuador Neumático

Rango de Presiones	2 bar (29 psig) a 8 bar (116 psig) en doble efecto. 3 bar (44 psig) a 8 bar (116 psig) en simple efecto. Máxima presión de operación 10 bar (145 psig).
Medio	Aire filtrado seco o lubricado. Para gas no corrosivo, agua o aceite hidráulico ligero, Rango de Temperaturas STD -20° C (4° F) a + 80° C (175° F).
Carrera	90° con ajuste standard +3° o -3°.
Lubricación	Todas las partes móviles están lubricadas en fábrica para el ciclo de vida del actuador.
Construcción	Apropiado para las instalaciones en intemperie o a cubierto.
Conexiones	Los agujeros inferiores para el montaje de la válvula están de acuerdo a ISO 5211/DIN3337.

Tabla 17: Características del Actuador Neumático

3.2.5.1.1.5.8 El Analizador: % de Oxígeno Modelo 3010MA

Analizador de Pureza de Oxígeno Paramagnético.



P/N M3010MA

Figura 71: Analizador de Pureza de Oxígeno Paramagnético

- Funciones del Equipo:

Seis Interruptores sensibles (touch-sensitive) a toque de membrana son usados para cambiar la función específica realizada por el analizador.

Analyze—Perform	Realiza el análisis para el contenido de oxígeno de un gas de la muestra.
System—Perform	Realiza tareas relacionadas con el sistema.
Span—Span calibrate.	Función de calibración del analizador.
Zero—Zero calibrate.	Función de calibración del analizador.
Alarms—Set the alarm setpoints and attributes.	Juego de alarmas seteada según la aplicación - atributos.
Range	Establecido por el usuario, gamas definibles para el instrumento.

Tabla 18: Funciones de Operación en Línea

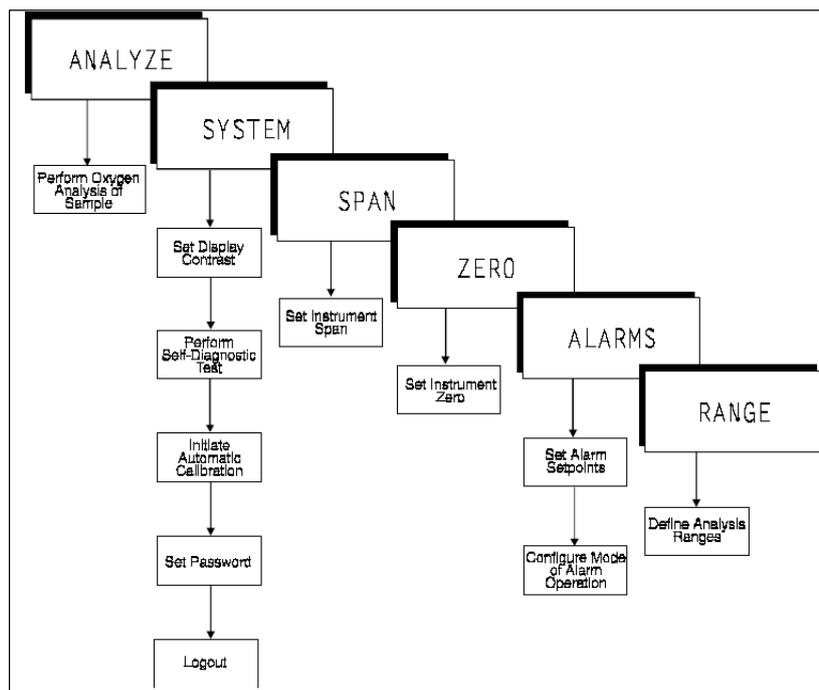


Figura 72: Funciones de Operación en Línea

- Interfaz de Equipo:

En el panel al reverso del Equipo, Modelo 3010MA para la Unidad de Control:

- Conexiones en este panel respecto a la fuente de poder.
- Comunicación RS-232 y conexiones a la Unidad de Análisis.

Power Connection	Fuente de corriente alterna.
Pressure In—1/4"	Entrada de Línea de gas a circuito ≈ 5 psi./ 1-2 scfh. Input to Unidad de Análisis para generar compensación.
Line voltage—Selector switch	El selector de voltaje de línea cambia para el voltaje de línea 115/230.
RS-232 Port—Serial digital concentration signal output and control input.	RS-232 - puerto señalan la entrada de control y la salida.

Tabla 19: Características de Conexión

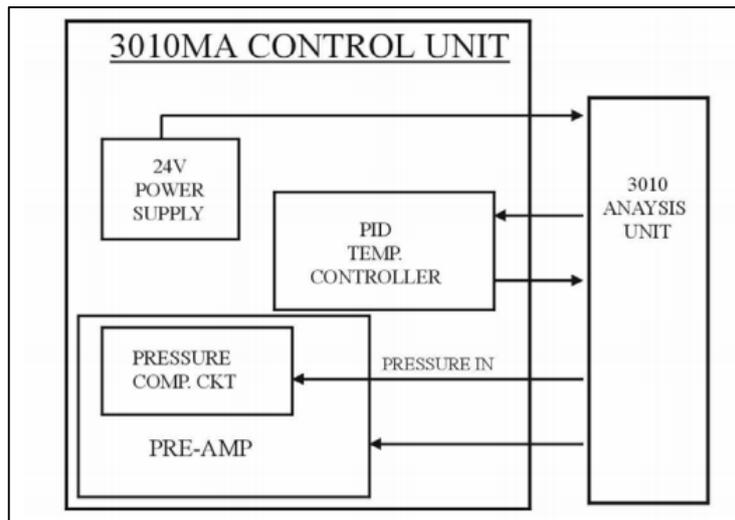


Figura 73a: Diagrama en Bloque para el Modelo 3010MA – Unidad de Control

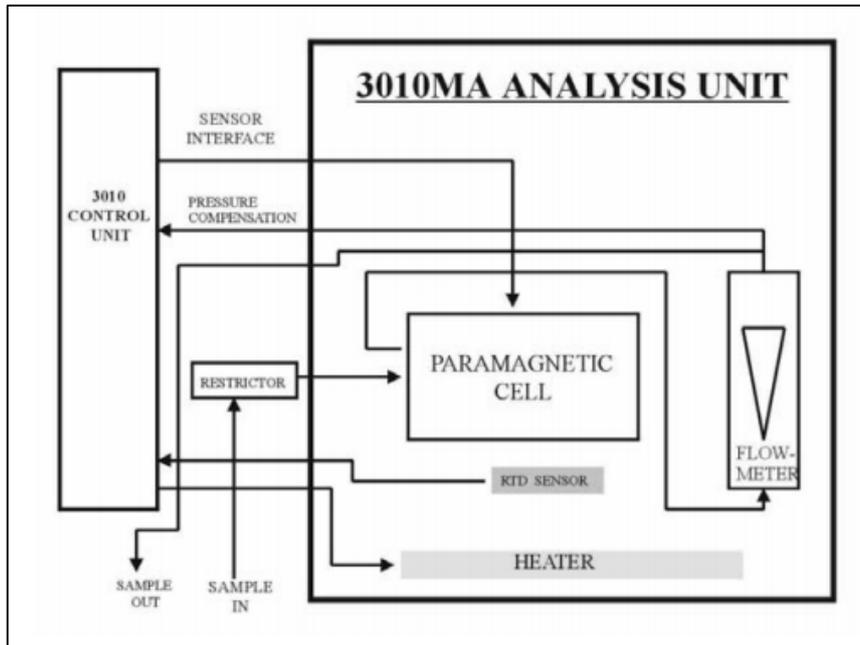


Figura 73b: Diagrama en Bloque para el Modelo 3010MA – Unidad de Control

3.2.5.1.1.6 Identificación Dinámica en el Proceso de Trasiego

El proceso de identificación consiste en la obtención del modelo a partir de mediciones del sistema a identificar. En la práctica, este proceso es iterativo, paso a paso hasta llegar a la última etapa de la validación donde nos preguntamos si el modelo estimado es suficiente al modelo real, en caso de que no válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:

- El conjunto de datos no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
- La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.

Dependiendo de la causa, deberá repetirse el proceso de identificación desde el punto correspondiente, cuyos pasos pueden observarse en el esquema de flujo que se presenta en la siguiente:

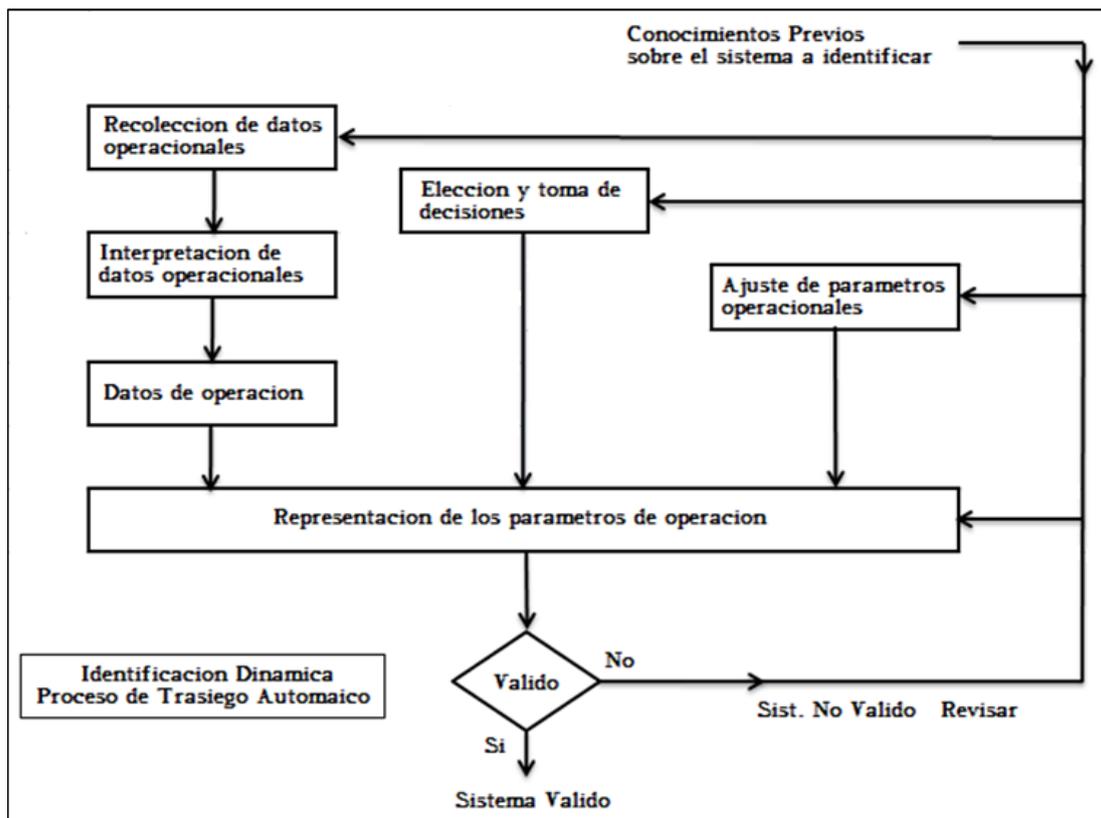


Figura 74: Esquema de Flujo del Proceso de Identificación

3.2.5.1.1.6.1 Método de Identificación

Existen diversos métodos de identificación, que pueden clasificarse según distintos criterios.

Dependiendo del tipo de modelo obtenido:

- *Métodos No Paramétricos*, este método nos permite obtener modelos no paramétricos, estos se caracterizan por la propiedad de que los modelos resultantes son curvas o funciones, los cuales no son necesariamente parametrizados mediante un vector de parámetros finito dimensional.
- *Métodos Paramétricos*, estos métodos requieren la elección de una posible estructura y número finito de parámetros que relacionan las señales de interés del sistema (entradas, salidas). Generalmente estos modelos permiten describir el comportamiento de cualquier sistema. La dificultad radica en la elección del tipo de modelo (orden del mismo, número de parámetros, etc.) que se ajuste satisfactoriamente a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.

3.2.5.1.1.6.2 Metodología Para la Identificación del Sistema de Trasiego Automático

La identificación de sistemas dinámicos es un planteamiento experimental para la obtención de modelos dinámicos que representen con exactitud la dinámica real del proceso.

Esta identificación incluye los pasos de estudio experimental, selección de la estructura, formulación de un criterio, estimación de los parámetros y la validación, por lo que podemos afirmar que el procedimiento de identificación de sistemas dinámicos es iterativo. Por ejemplo, cuando se tiene el conocimiento pobre de un proceso que deseamos identificar, es razonable comenzar con un análisis de datos localizados, basándose en los resultados se puede mejorar la estructura del modelo, haciendo nuevos experimentos.

En la práctica se ha realizado experimentos en el proceso, de manera que se obtenga cierto índice de datos el cual ha servido como base fundamental para el diseño, por el hecho que debemos realizar muchos ensayos.

Para mostrar el funcionamiento y convergencia del sistema propuesto, se ha realizado simulaciones, utilizando los modelos previamente identificados a partir de datos reales (Identificación Paramétrica Fuera de Línea). Donde se obtuvieron resultados satisfactorios.

3.2.5.2 Análisis de Datos

La obtención de forma experimental del sistema de trasiego, conlleva al conocimiento previo del comportamiento físico, es decir, que leyes físicas rigen su comportamiento, si es estable o inestable, etc. En cuanto a su funcionamiento, esto puede ser proporcionado por los fabricantes y por los operarios quienes determinan las cualidades del proceso.

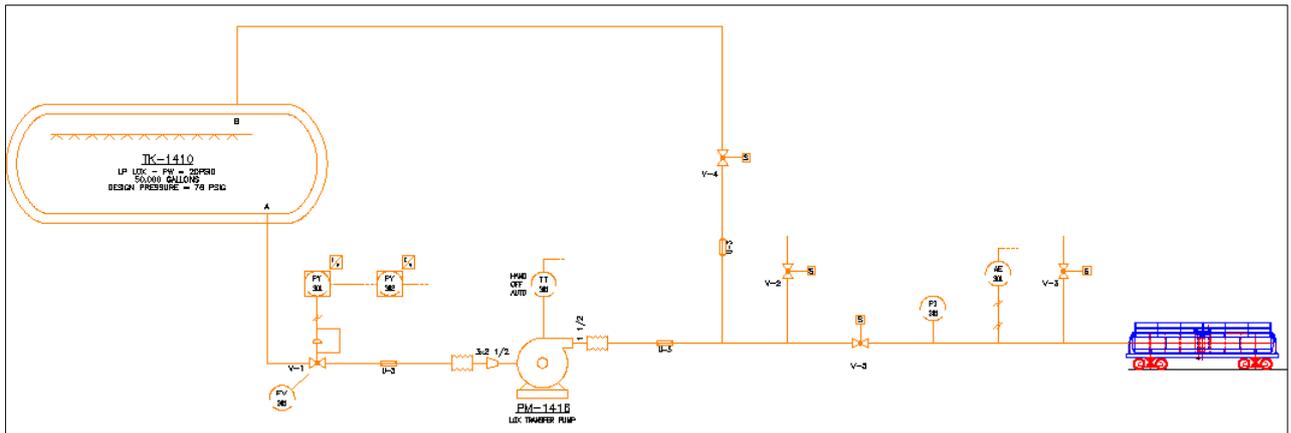


Figura 75: Diagrama – Sistema de Trasiego Automático

Se realizó los ensayos experimentales sobre el proceso de trasiego para obtener la curva característica del proceso en función a la temperatura, lo que posibilita conocer el rango de operación donde el proceso es lineal, con esa información se procedió a la identificación no paramétrica mediante el análisis transitorio obteniendo la respuesta al escalón.

El equipamiento para la integración de señales está constituido por el sistema DCS de planta A.S.U. una tarjeta de señal de entrada RTM para el sensor, siendo el caso una RTD y una tarjeta SAM para la acción de control transmitiendo una señal de 4 a 20 mA.

3.2.5.2.1 La Red de Trasiego:

El circuito de tuberías que forman la red de trasiego, es diseñado y dimensionado de acuerdo a capacidades específicas, respecto al flujo de transferencia por medio de una bomba para uso de fluidos criogénicos, teniendo encuentra una variable fundamental, el cual es una característica obtenida por convección a consecuencia del oxígeno líquido que se encuentra a condiciones criogénicas.

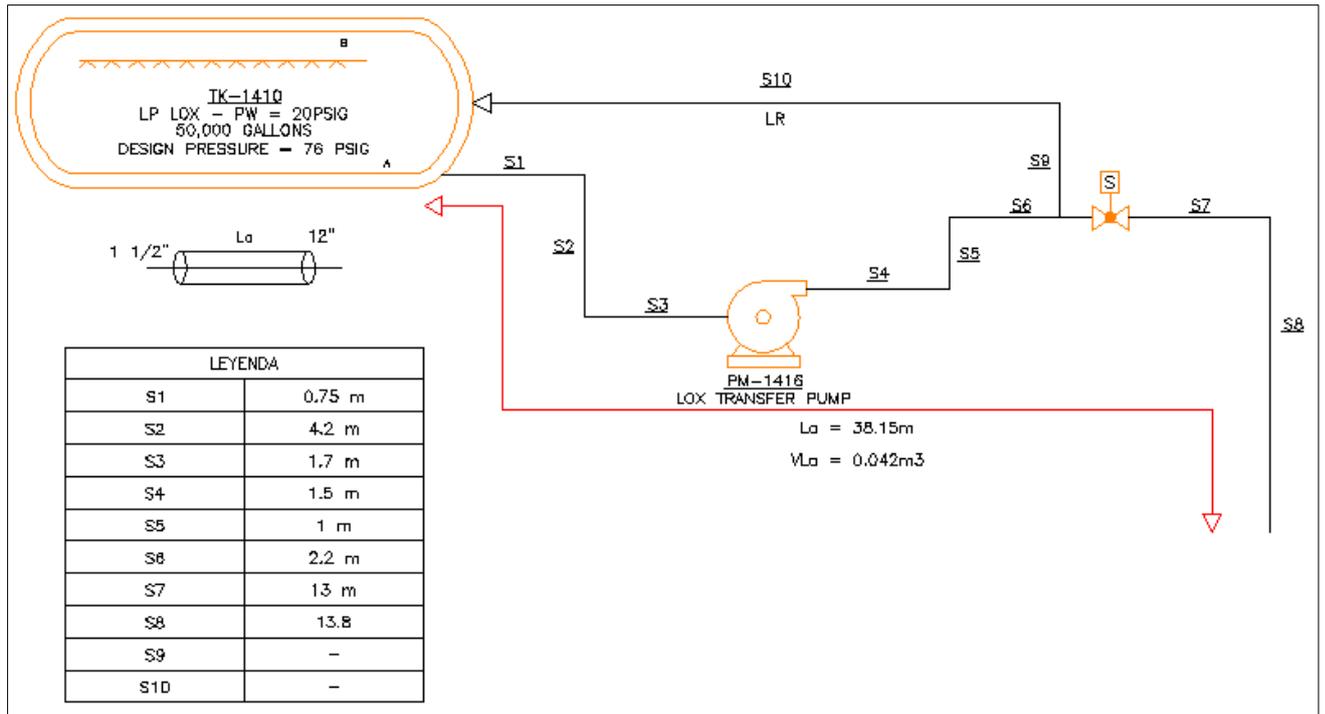


Figura 76: Dimensionamiento del Sistema de Trasiego Automático

Donde se identifica:

- **La**, representa la trayectoria del flujo en la operación de transferencia (muestra - análisis).
- **Lr**, representa el retorno de recirculación que cumple la función de enfriamiento sin purga de producto.

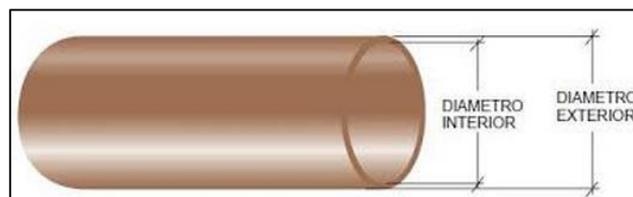


Figura 77: Tubería Rígida de Cobre Tipo "K" De 1 1/2"Ø

3.2.5.2.1.1 Descripción General:

Tubería de cobre tipo "K" en medidas de 3/8" a 4".

3.2.5.2.1.2 Especificaciones Generales:

La tubería rígida de cobre se fabrica bajo la Norma ASTM B88. Se usa en instalaciones de Gas Combustible y Medicinal, tomas Domiciliarias de Agua Potable, además de uso Industrial donde las presiones y temperaturas de trabajo son severas.

Tamaño nominal de la tubería (pulgadas)	Diámetro exterior		Grosor de la pared		Diámetro interior			Area de flujo	
	(pulg)	(mm)	(pulg)	(mm)	(pulg)	(pie)	(mm)	(pie ²)	(m ²)
1/8	0,250	6,35	0,035	0,889	0,180	0,0150	4,572	1,767 x 10 ⁻⁴	1,642 x 10 ⁻⁵
¼	0,375	9,53	0,049	1,245	0,277	0,0231	7,036	4,185 x 10 ⁻⁴	3,888 x 10 ⁻⁵
3/8	0,500	12,70	0,049	1,245	0,402	0,0335	10,21	8,814 x 10 ⁻⁴	8,189 x 10 ⁻⁵
½	0,625	15,88	0,049	1,245	0,527	0,0439	13,39	1,515 x 10 ⁻³	1,407 x 10 ⁻⁴
5/8	0,750	19,05	0,049	1,245	0,652	0,0543	16,56	2,319 x 10 ⁻³	2,154 x 10 ⁻⁴
¾	0,875	22,23	0,065	1,651	0,745	0,0621	18,92	3,027 x 10 ⁻³	2,812 x 10 ⁻⁴
1	1,125	28,58	0,065	1,651	0,995	0,0829	25,27	5,400 x 10 ⁻³	5,017 x 10 ⁻⁴
1 ¼	1,375	34,93	0,065	1,651	1,245	0,1037	31,62	8,454 x 10 ⁻³	7,854 x 10 ⁻⁴
1 ½	1,625	41,28	0,072	1,829	1,481	0,1234	37,62	1,196 x 10 ⁻²	1,111 x 10 ⁻³
2	2,125	53,98	0,083	2,108	1,959	0,1632	49,76	2,093 x 10 ⁻²	1,945 x 10 ⁻³
2 ½	2,625	66,68	0,095	2,413	2,435	0,2029	61,85	3,234 x 10 ⁻²	3,004 x 10 ⁻³
3	3,125	79,38	0,109	2,769	2,907	0,2423	73,84	4,609 x 10 ⁻²	4,282 x 10 ⁻³
3 ½	3,625	92,08	0,120	3,048	3,385	0,2821	85,98	6,249 x 10 ⁻²	5,806 x 10 ⁻³
4	4,125	104,8	0,134	3,404	3,857	0,3214	97,97	8,114 x 10 ⁻²	7,538 x 10 ⁻³
5	5,125	130,2	0,160	4,064	4,805	0,4004	122,0	1,259 x 10 ⁻¹	1,170 x 10 ⁻²
6	6,125	155,6	0,192	4,877	5,741	0,4784	145,8	1,798 x 10 ⁻¹	1,670 x 10 ⁻²
8	8,125	206,4	0,271	6,883	7,583	0,6319	192,6	3,136 x 10 ⁻¹	2,914 x 10 ⁻²
10	10,125	257,2	0,338	8,585	9,449	0,7874	240,0	4,870 x 10 ⁻¹	4,524 x 10 ⁻²
12	12,125	308,0	0,405	10,287	11,315	0,9429	287,4	6,983 x 10 ⁻¹	6,487 x 10 ⁻²

Tabla 20: Dimensiones de Tuberías de Cobre Tipo k

- Para el sistema de trasiego automático, los análisis se realizan en función a la tubería de cobre tipo "K" en medidas de 1 1/2" a lo largo de toda su dimensión.

3.2.5.2.2 Análisis de Pureza del Sistema de Trasiego Automático

- Análisis de oxígeno:

El paramagnetismo es la tendencia de los momentos magnéticos libres (espín u orbitales) a alinearse paralelamente a un campo magnético. Si estos momentos magnéticos están fuertemente acoplados entre sí, el fenómeno será ferromagnetismo. Cuando no existe ningún campo magnético externo, estos momentos magnéticos están orientados al azar. En presencia de un campo magnético externo tienden a alinearse paralelamente al campo, pero esta alineación está contrarrestada por la tendencia que tienen los momentos a orientarse aleatoriamente debido al movimiento generado por un acción térmica.

A diferencia del resto de los gases, el oxígeno es fuertemente atraído por campos magnéticos potentes. Este paramagnetismo se utiliza para obtener medidas rápidas y precisas.

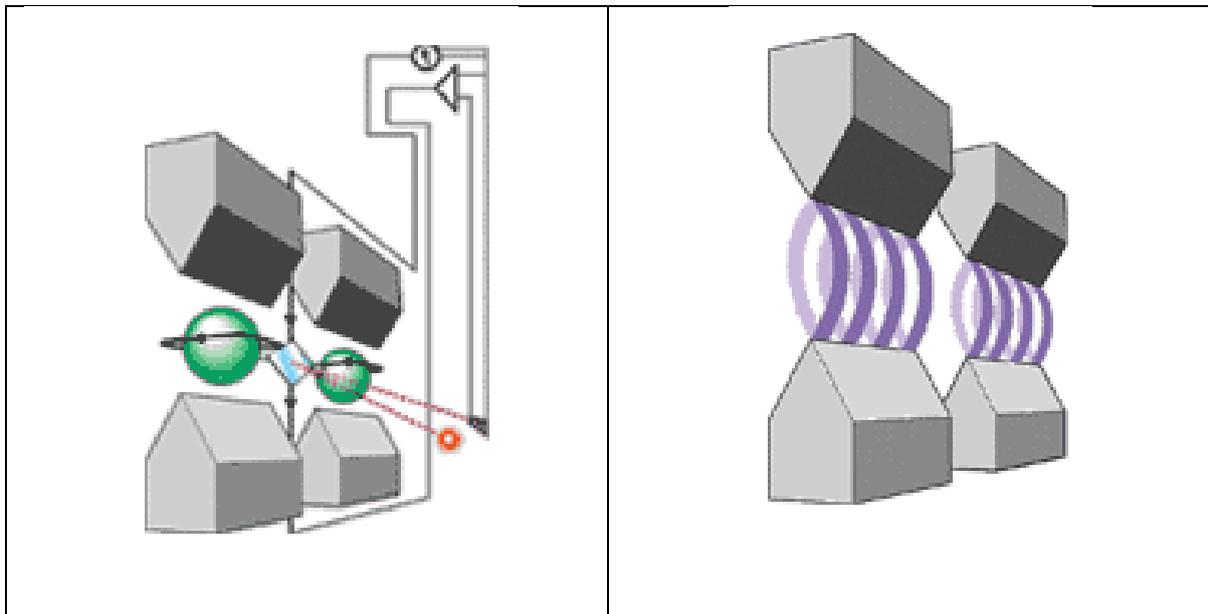


Figura 78: Comportamiento del Oxígeno en Campos Magnéticos

Se crea un campo magnético concentrado. El oxígeno presente es atraído hacia la zona más fuerte del campo magnético y en relación a ello se determina el porcentaje de oxígeno que presenta la muestra.

En este punto vamos a demostrar que al activar inicialmente la apertura de la válvula de control a un 30% se genera el desplazamiento del oxígeno, que en principio de manera instantánea este es un flujo gaseoso a consecuencia de un factor termodinámico, pues el oxígeno encontrándose a condiciones criogénicas pasa de un estado líquido a gaseoso por condiciones ambientales, es decir a 1 atmósfera y a temperatura ambiente $\approx 23^{\circ}\text{C}$. Este flujo gaseoso de oxígeno es ideal para ser considerado una muestra, el cual es analizado y determinar de manera una condición de variable crítica para nuestra aplicación.

La red de trasiego se encuentra sumergida en aire, humedad y partículas sólidas que ingresan dentro de la línea de trasiego, esto es porque la red es considerada un sistema parcialmente hiperbárica, es decir está parcialmente aislada de manera térmica respecto a condiciones ambientales.

La muestra de oxígeno es obtenida de la línea de trasiego, como se observa en la figura la calidad del oxígeno es del 95.81%. Este valor aun es inadecuado para la operación de trasiego ya que en la red aún está compuesto por el flujo de oxígeno e impurezas antes mencionadas que se va desplazando al ambiente a través de purgas en el extremo de la red.

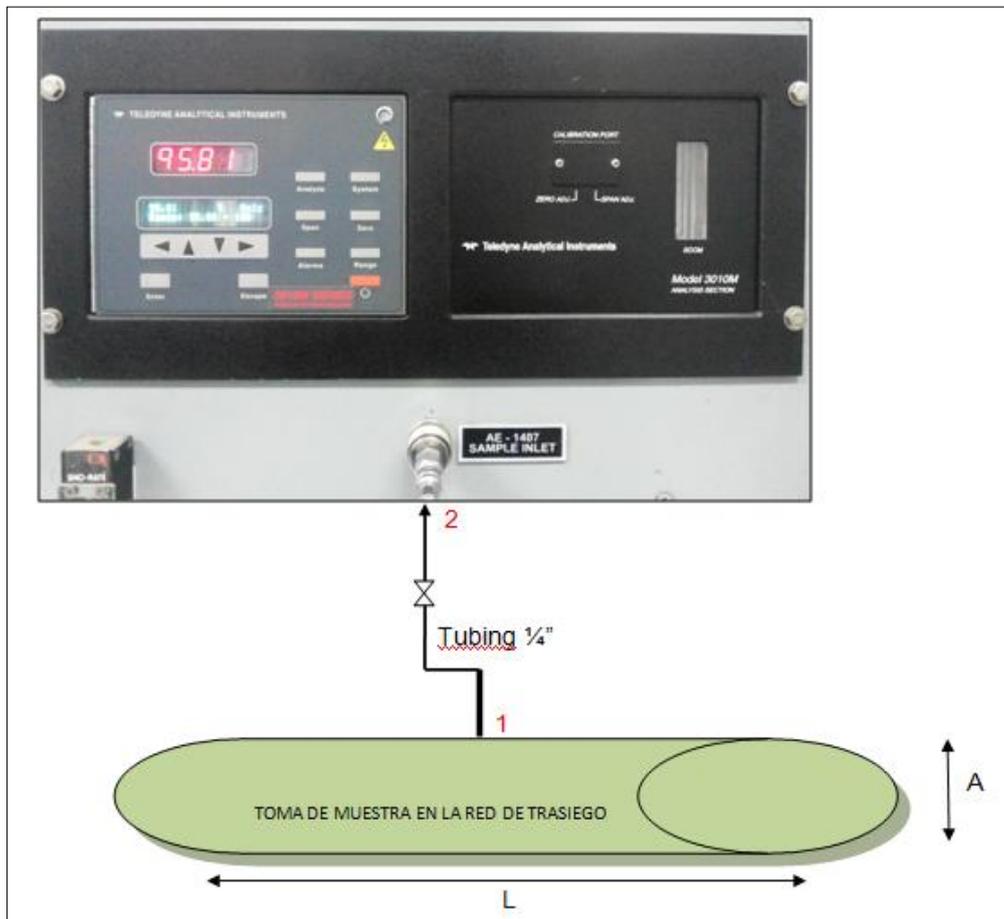


Figura 79: Resultado del Análisis al Inicio de la Operación

En un periodo de tiempo se obtiene una calidad de oxígeno mayor del 99.0 % a consecuencia del desplazamiento que genera el oxígeno con respecto a dichas impurezas.

Se alcanza una pureza adecuada del 99.75% en un tiempo determinado, el cual se establece mas adelante, esta variable es de condicion critica pues nos determina el tiempo necesario para la activacion y cierre de valvulas, que es importante para las operaciones en secuencia que se activaran en el sistema de trasiego.

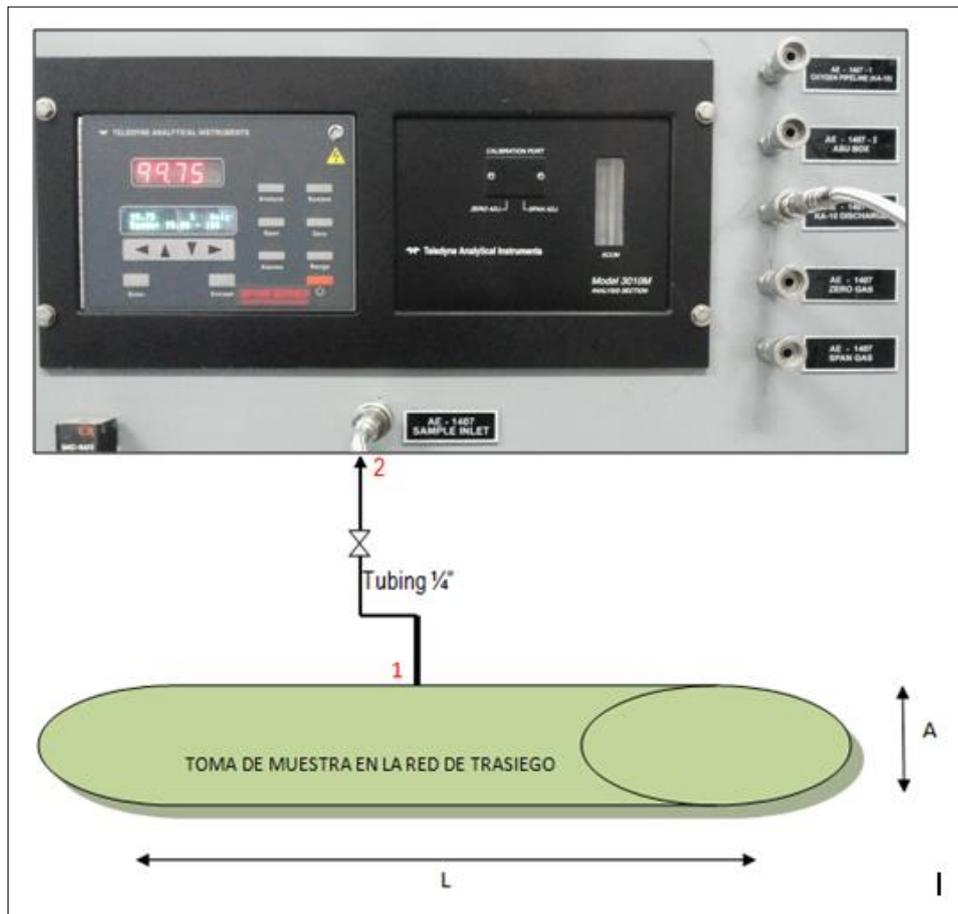


Figura 80: Resultado del Análisis Durante el Periodo Predeterminado

Determinando el volumen de la red de trasiego, respecto a la toma de muestra para un análisis adecuado:

Formado en la red de trasiego por un conjunto de secciones. En la siguiente tabla muestra las dimensiones de cada sección que conforman la longitud “La” respectivamente así también como el diámetro de la sección transversal y el volumen respectivo del conducto de tubería. (Ver Tabla 17)

Volumen del Circuito de Trasiego - Analisis.			
<i>Tubo de cobre tipo k para Diametro de 1 1/2"</i>			
<i>Seccion</i>	<i>Area Secc. T. (m2)</i>	<i>Longitud La (m)</i>	<i>Volumen (m3)</i>
S1	0.001111	0.75	0.00083325
S2		4.2	0.0046662
S3		1.7	0.0018887
S4		1.5	0.0016665
S5		1	0.001111
S6		2.2	0.0024442
S7		13	0.014443
S8		13.8	0.0153318
Volumen respecto a "La"		38.15	0.04238465

Tabla 21: Datos y Calculo del Volumen Respecto a "La"

Como sabemos el área de sección transversal es $A=1.111 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, uniforme en toda su longitud, sumando las ocho secciones obtenemos $La = 38.15 \text{ m}$. por lo que determinamos el Volumen = 0.042 m^3

Los gases se miden usualmente en términos volumétricos, más que por peso; sin embargo, las relaciones de energía usadas en la obtención de la fórmula fundamental para el flujo de fluidos compresibles se presentan más fácilmente cuando se considera un peso dado de fluido. Posteriormente se introducen los factores de conversión de peso a volumen.

La ecuación general de flujo también denominado ecuación fundamental de flujo relaciona el caudal (Q_s) a las condiciones estándar, las propiedades del gas, la longitud de la tubería (L) y la temperatura del flujo (T) existente entre las presiones de entrada y de salida (P_1, P_2) de un segmento de tubería de diámetro constante (d) como se muestra en la figura siguiente:

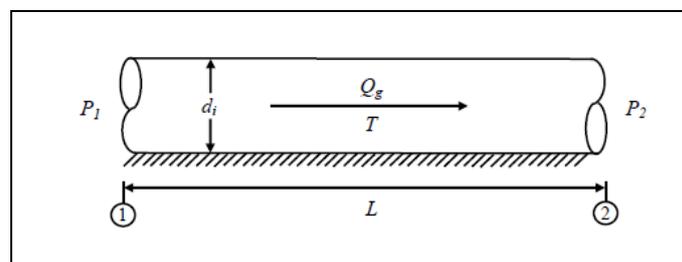


Figura 81: Representación del Flujo de un Gas en una Tubería

La Ecuación General de Flujo permite determinar la caída de presión debido a la fricción en el interior de la tubería y explicar adecuadamente los cambios en las propiedades de los gases debido a la presión y la temperatura para cualquier sección de la tubería (Crane Co., 1982), (GPSA, 1998).

La Ecuación General de Flujo está representada por la siguiente ecuación:

Por medio de la ecuación de Weymouth adecuada para el cálculo de sistemas típicos de distribución, para el caso del sistema de trasiego.

$$Q_s = 77.54 \cdot E \cdot \left(\frac{T_a}{P_a} \right) \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{S_g \cdot T \cdot L \cdot Z} \right)^{0.5} \cdot d_i^{2.5} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

Q_s = flujo volumétrico de salida del gas a condiciones estándar, m³/min.

T_a = temperatura estándar, °C

P_a = presión estándar, psi

P_1 = presión absoluta de entrada, psi

P_2 = presión absoluta de salida, psi

S_g = gravedad específica del gas, adimensional

T = temperatura absoluta de operación, °C

L = longitud de la tubería, m

Z = factor de compresibilidad a la presión y temperatura de operación, adim.

d_i = diámetro interior de la tubería, m

Asimismo, estas ecuaciones incorporan el factor de eficiencia **E** de la tubería, el cual es un factor que representa la condición de operación de una tubería respecto al tiempo de servicio.

En la Tabla 18 se presenta la recopilación de algunos valores con base a la experiencia a distintas condiciones de operación (Crane Co., 1982).

$E =$	1.0 para tuberías nuevas sin curvas, codos, válvulas, ni cambios de diámetro o elevación.
$E =$	0.95 para condiciones de operación muy buenas, por lo general dentro de los 12-18 meses.
$E =$	0.92 para condiciones de operación promedio.
$E =$	0.85 para condiciones de operación desfavorables.

Tabla 22: Valores del factor de eficiencia E, para las distintas condiciones

- **Para nuestro caso:** La notación para la ecuación 3.1 puede ser en cualquier sistema de unidades.

Obteniendo los datos antes demostrados:

T_a = considerando $\approx 23^\circ\text{C}$

P_a = presión atmosférica ≈ 14.7 psi

P_1 = presión en el tanque ≈ 20.0 psi

P_2 = presión tiende a cero ≈ 0 psi

S_g = gravedad específica del gas ≈ 1.105 (adimensional)

T = temperatura absoluta de operación $\approx [-183^\circ\text{C}]$

L_a = longitud de la tubería ≈ 38.15 m

Z = factor de compresibilidad a la Presión y Temp. de operación ≈ 0.9994 adim.

d_i = diámetro interior de la tubería ≈ 0.03762 m

E = tubería nueva por ser nueva aplicación ≈ 1.0

Reemplazando los datos en la ecuación y determinar el flujo volumétrico:

$$Q_s = 77.54 \cdot (1.0) \cdot \left(\frac{23^\circ\text{C}}{14.7\text{psi}} \right) \cdot \left(\frac{(20\text{psi})^2 - (0)^2}{(1.105) \cdot (183^\circ\text{C}) \cdot (38.15\text{m}) \cdot (0.9994)} \right)^{0.5} \cdot (0.03762)^{2.5}$$

$$Q_s = 0.0714 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Por criterio redundante se determina la estabilidad de la muestra para un periodo menor o igual a un minuto por lo que la activación en este caso de las válvulas se realizara en un periodo equivalente a 60 seg.

$$Q_s = 4.277 \text{ m}^3/\text{min}$$

El volumen "La" corresponde al volumen conformada por una serie de tuberías desde la salida del tanque de oxígeno líquido hasta la parte extrema de la zona de purga en la red de trasiego, como se observa en la figura 71. Por lo que se puede determinar según la siguiente relación:

- 1kg de LOX $\approx 0.745 \text{ m}^3$ de GOX
Por teoría de las propiedades físicas referente al oxígeno líquido.
- Volumen "La" = 0.042m^3 (Línea de trasiego – Análisis por desplazamiento)

Se determina que con 1.0 Kg. de Oxígeno Líquido es suficiente para cubrir en volumen hasta 18 veces dicha red, de manera secuencial determinando dentro de este proceso una adecuada pureza.

Por lo tanto mediante los cálculos realizado, para el inicio de la operación de trasiego en el periodo de purificación generado (equivalente a un minuto). El flujo de oxígeno gaseoso que sale del tanque de

almacenamiento es equivalente a $Q_s = 4.277 \text{ m}^3/\text{min}$, entonces se purgara al ambiente (operación de venteo) un valor de 5.67 Kg de Oxígeno.

La respuesta está establecida por el analizador de porcentaje de oxígeno el cual según los cálculos por desplazamiento se determina que en un periodo de 60 segundos se debe de obtener los parámetros suficientes para que el analizador de un resultado positivo. Pero se debe entender que dicho periodo corresponde a la acción de control de activación de válvulas (control todo o nada) sin tener en cuenta los retardos generados por el analizador (estabilidad de análisis).

3.2.5.2.3 Identificación no Paramétrica del Sistema de Trasiego

Se realizaron los experimentos para identificación no paramétrica para obtener los datos y gráficos con el objetivo de obtener el comportamiento dinámico del sistema de trasiego.

- Determinación de la zona lineal en el sistema de trasiego

A partir de las *características estáticas* del sistema de trasiego, se determina la zona de operación donde el proceso se comporta como sistema lineal, esto es una aproximación utilizada para linealizar un sistema no lineal.

La obtención de la zona lineal se obtiene mediante la experimentación en lazo abierto del sistema. Esto es levantar una curva de la medida correspondiente a cada valor escalar de la variable manipulada en toda la zona de control, obteniéndose una tabla de datos U_i, Y_s . Esta señal de control u debe ser lo suficientemente grande a fin de obtener una respuesta analizable para poder observar los límites de la linealidad del proceso.

Para obtener la zona lineal, se ha seguido el siguiente procedimiento:

1. Se calculan varios puntos con relación a la entrada y la salida del proceso.
2. Se obtiene el punto (U_i, Y_i) de la característica estática, haciendo que la señal de entrada sea fijada a un valor constante ($U_i = \text{constante}$), y la salida del proceso es medida cuando se ha alcanzado el estado estable ($Y_i = Y_s$).
3. Se repite el procedimiento anterior para el rango de interés de la señal de entrada, es decir del 35 al 95% de apertura de la válvula.
4. En base a los puntos hallados se traza la curva respectiva.

- Se determina la zona lineal (segmento que presenta linealidad).

Normalmente, en el análisis de la característica estáticas del sistema encontramos un segmento lineal, por lo que notamos que el sistema presenta variaciones en sus parámetros pero no tan significativos ya que la variable manipulada va cambiando respecto a la apertura de la válvula presentando un comportamiento familiar y del mismo sentido, si esta variación es pequeña, la aproximación que se realiza en una zona de trabajo es adecuada y aceptable.

Entrada Escalón U_i		Respuesta en estado estable Rango: $T_a @ -183^\circ\text{C}$
Corriente 4 a 20 mA	Valor en % de apertura de la Válvula 35 – 100%	
Apertura de la Válvula		Temperatura del Sistema
9.6	35	-3.895
10.4	40	-16.056
11.2	45	-33.146
12.0	50	-51.863
12.8	55	-69.701
13.6	60	-84.341
14.4	65	-99.839
15.2	70	-113.998
16.0	75	-127.245
16.8	80	-139.023
17.6	85	-153.222
18.4	90	-162.718
19.2	95	-172.831
20	100	-179.995

Tabla 23: Característica del Proceso de Trasiego

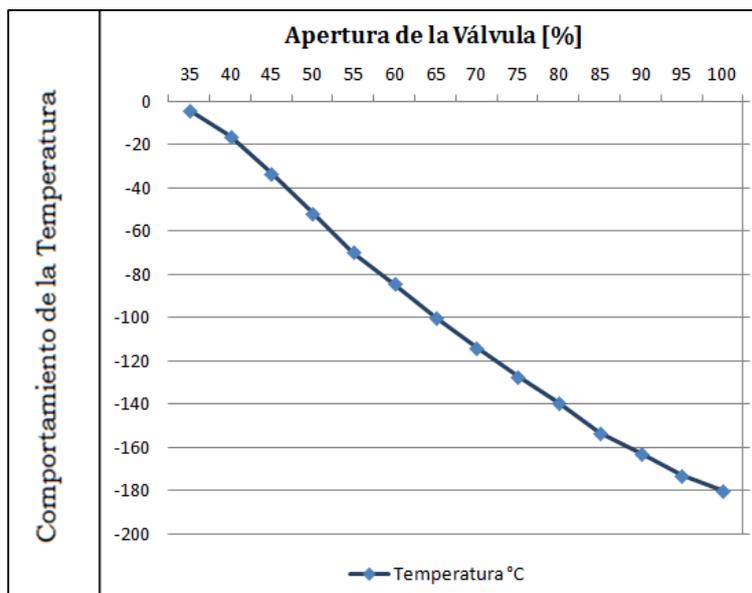


Figura 82: Característica del Sistema de Trasiego

Esta respuesta se caracteriza con el tiempo de atraso y la constante de tiempo. Y se puede aproximar por un sistema de primero orden con atraso de transporte.

En la tabla 20 se muestra una representación del Sistema en función a Q_{Θ} que determina el periodo de arranque.

Entrada Escalón U_i		Respuesta en estado estable Rango: $T_a @ -183^{\circ}\text{C}$	Respuesta Proporcional al Flujo Q_{Θ}
Corriente 4 a 20 mA	Valor en % de apertura de la Válvula 35 – 100%		Respuesta: Estimacion aproximada: Y_s @ $T_a \rightarrow Q_{\Theta} \rightarrow \text{min.}$ @ $-183^{\circ}\text{C} \rightarrow Q_{\Theta} \rightarrow \text{máx.}$
Apertura de la Válvula		Temperatura del Sistema	Q_{Θ} Flujo de Oxigeno Líquido
9.6	35	-3.895	Q_i
10.4	40	-16.056	Respuesta comportamiento lineal : incremento del flujo a niveles de tempeatura criogenico
11.2	45	-33.146	
12.0	50	-51.863	
12.8	55	-69.701	
13.6	60	-84.341	
14.4	65	-99.839	
15.2	70	-113.998	
16.0	75	-127.245	
16.8	80	-139.023	
17.6	85	-153.222	
18.4	90	-162.718	
19.2	95	-172.831	
20	100	-179.995	

Tabla 24: Periodo de Arranque

Se puede apreciar que existe un comportamiento lineal en el rango de apertura de la válvula, en la curva de la característica estática del sistema de trasiego. No se ha considerado el tramo de 0% a 30% ya que ello responde a una secuencia anterior de operación cuya señal que origina una acción de control establecida por un pulso premeditado. El modelo de comportamiento de la temperatura considerado un periodo de enfriamiento por transferencia de masa que genera el fluido va disminuyendo progresivamente en función a la apertura de la válvula, estos datos serán usados para establecer el Rango de Operación. Para efectos de comparación y evaluación se consideró:

- Zona Lineal: 40% al 95% de apertura de válvula.

Puede que encontremos más zonas de trabajo, por el mismo hecho de que el sistema pueda presentar una zona no lineal y ser variante en el tiempo, si esto ocurriese seria consecuencia a muchos factores de los cuales podemos mencionar; retardos, zonas muertas (offset), variación de parámetros, entre otras cosas. Pero para nuestro caso se ha tomado en consideración una zona lineal como se indicó (a partir de estos segmento lineal se ha determinado el modelo).

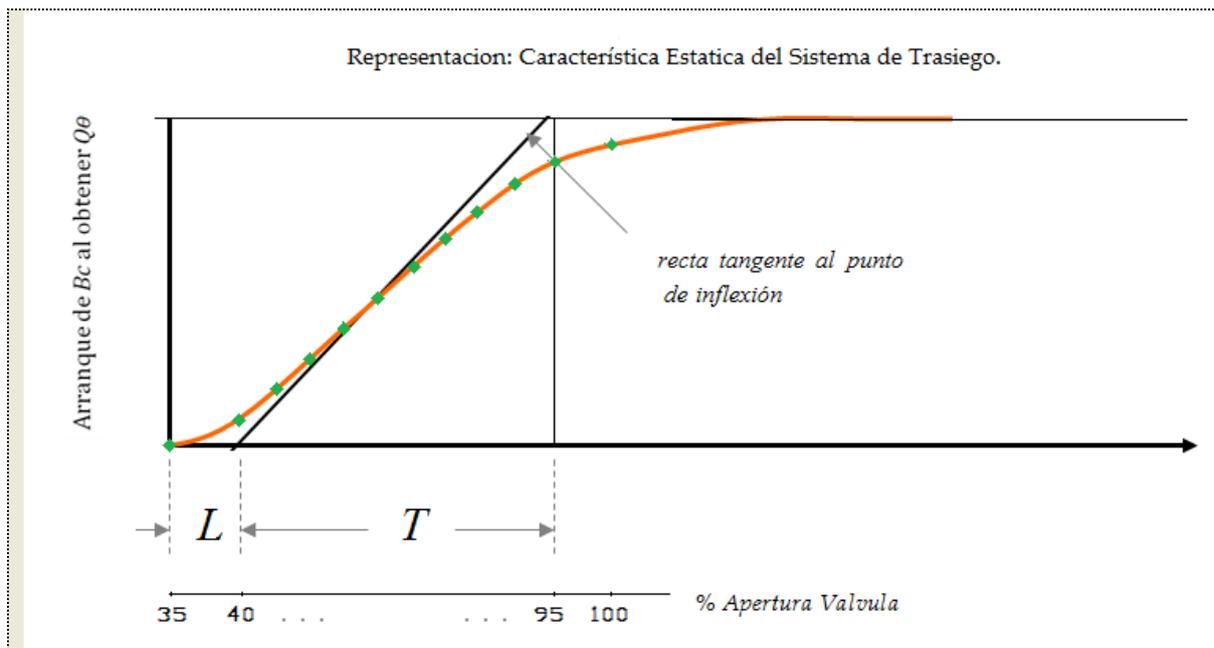


Figura 83: Respuesta del Sistema en función a $Q\theta$ (condición de energía) que determina el periodo estable para arranque de Bc

Se obtiene experimentalmente la respuesta de la planta a una entrada escalón y si la respuesta no tiene oscilaciones y además posee un retardo tal que se forma una “ese”, pueden obtenerse los parámetros del controlador PI utilizando el primer método.

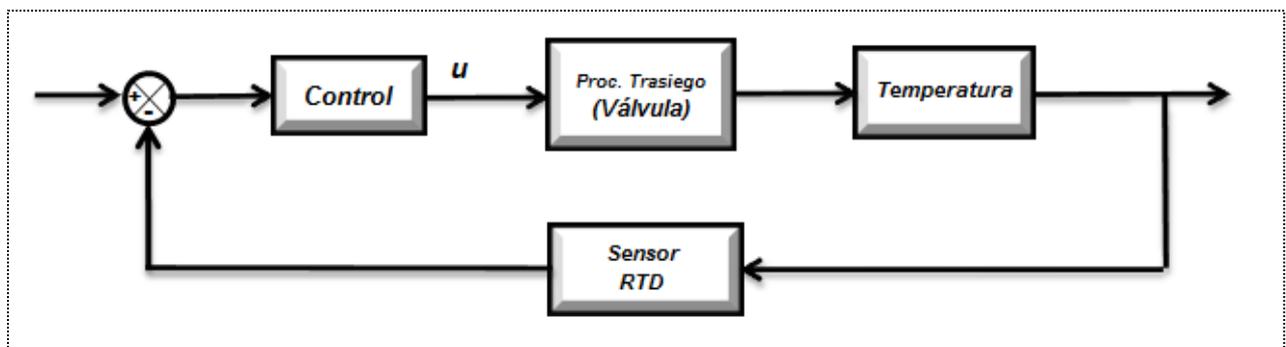


Figura 84: Diagrama de Bloques planteado para el Sistema de Trasiego Automático

- Determinación de la Respuesta al Escalón de la Planta Modelo de Presión

Uno de los métodos clásicos y más primitivos de identificación de sistemas lineales LTI, es a partir del análisis de la respuesta (transitoria) del sistema a entradas particulares, generalmente escalón o impulso (La excitación del sistema con un impulso no siempre es posible, por razones de implementación, seguridad, económicas, etc.). A partir de estas mediciones sobre la respuesta al escalón del sistema se obtuvo una primera estimación de los parámetros del modelo, además de ofrecernos una información valiosa del modelo a estimar (tiempo retardo,

constante de tiempo, ganancia estática, tiempo de establecimiento), que posteriormente será utilizado en la identificación paramétrica.

Este experimento consiste en aplicar una señal escalón a la válvula, el cual para fines de expresión se analizara en función a la transferencia de energía, respecto al flujo de oxígeno, que al encontrarse la red de trasiego por un factor de convección a una temperatura criogénica este flujo se comportara como flujo incompresible, es decir pasara a ser liquido en su totalidad.

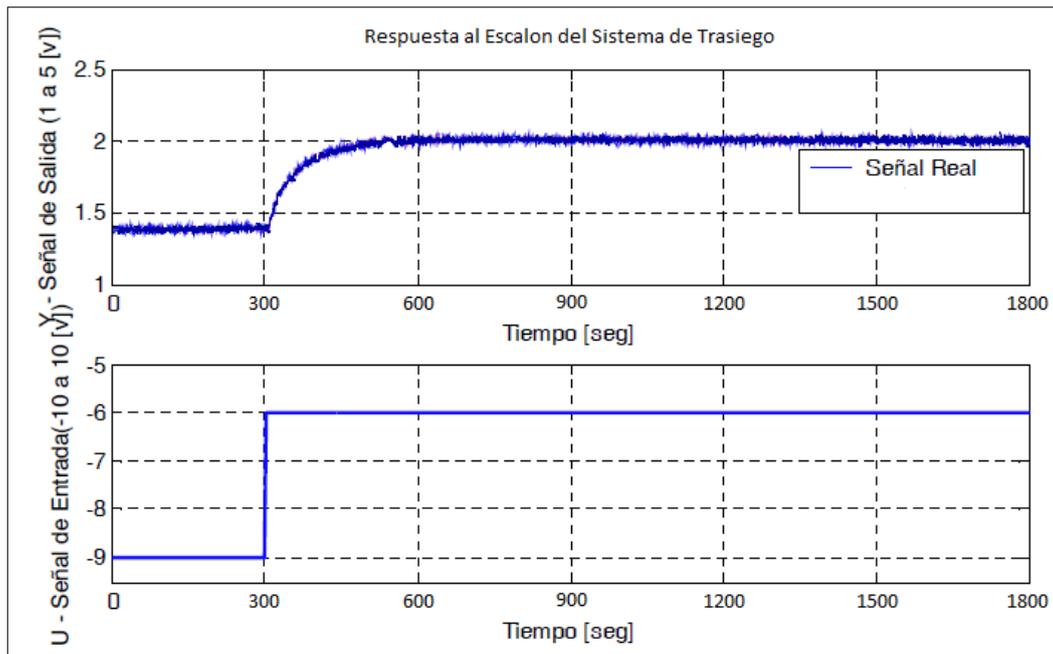


Figura 85: Resultados Experimentales de la Respuesta al Escalón para el Sistema de Trasiego

Nótese que la respuesta al escalón de la planta representa a un sistema de primer orden.

En este caso vamos aproximar la respuesta mediante un modelo de primer orden, cuyo comportamiento dinámico se describe mediante la expresión:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

Dónde:

K ganancia estática K

τ constante de tiempo

L retardo de tiempo

La respuesta al escalón de la planta modelo de presión, nos permite obtener de forma gráfica de estos parámetros.

La ganancia estática K, se obtiene de la relación entre el valor final de u_{ss} e y_{ss} , tal como muestra la siguiente relación:

$$K = \frac{Y_s}{U_s} = \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{Y_{\text{máx}} - Y_{\text{mín}}}{U_{\text{máx}} - U_{\text{mín}}} = 2.2$$

Para obtener la constante de tiempo y el tiempo retardo, se toman dos puntos de la curva que corresponden al 35.0% y al 95.0% del valor estacionario final (más el offset de $y[k]$), y se determinan $t_{0.350}$ y $t_{0.950}$, luego se plantean las ecuaciones:

$$t_{0.350} = L + \frac{\tau}{3}$$

$$t_{0.950} = \tau$$

El tiempo de retardo es igual a:

$$L = d \times h$$

Dónde:

d el retardo puro, y

h el tiempo de muestreo.

De los cálculos efectuados se tiene:

$$L \approx 60 \text{ seg. (d=60; h=1)}$$

$$\tau \approx 300 \text{ seg.}$$

De la respuesta al escalón de la planta se obtuvieron los siguientes resultados:

Retardo de tiempo $L \approx 60$ seg., constante de tiempo $\tau \approx 5.0$ seg., ganancia estática $K \approx 2.2$, tiempo de establecimiento $t_s \approx 300$ seg.

Este modelo obtenido a partir de la identificación no paramétrica puede ser utilizado directamente en el diseño de controladores PI usando el método de Ziegler y Nicholls.

3.2.5.2.4 Sistema Automático en función a una Secuencia de Operaciones:

Se establece una estructura lógica en secuencias que rigen una funcionalidad a tiempos predeterminados el cual son representativos para una operación eficiente para el Sistema de Trasiego Automático:

Podemos describir el funcionamiento del sistema de trasiego automático mediante funciones de operación:

La Figura 81 muestra un diagrama de funciones de operación del sistema de trasiego de manera automática.

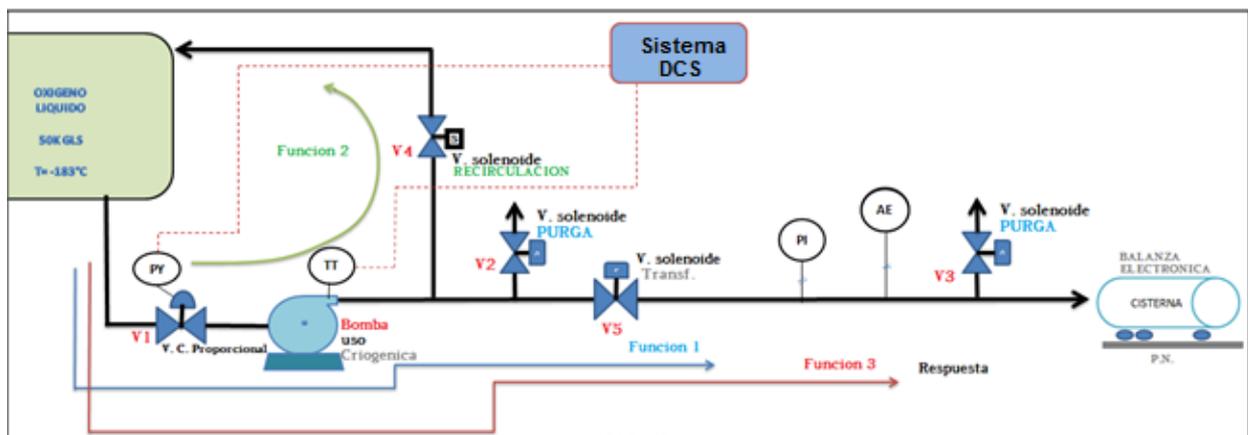


Figura 86: Sistema de Trasiego Automático

- 1° Función: Inicia el proceso de trasiego abriendo la válvula V(1) y con ello purificar la red.
- 2° Función: Al obtener una adecuada pureza debemos recircular el producto hacia el tanque hasta alcanzar una temperatura en la red (Bc) del orden criogénico sin pérdida de producto.
- 3° Función: Cuando se cumpla las funciones antes mencionadas, se activa la Bomba Criogénica (Bc). Obteniendo una respuesta favorable para nuestro propósito.
- 4° Función: Culmina la operación al establecer el peso destinado, parando la Bomba Criogénica y retornando a las condiciones iniciales.

En la Red de trasiego Automático:

V(1): Válvula de control Proporcional
V(2), V(3), V(4), V(5): Válvulas Solenoides
Bc: Bomba Criogénica
TT: Transmisor de Temperatura
PT: Transmisor de Presión
AE: Transmisor de % de O₂

Condiciones Iniciales:

V(1), V(4): N.C. (Normalmente Cerradas)
V(2), V(3), V(5): N.A (Normalmente Abiertas)
Bc: Apagado

En el estudio se genera una secuencia de operación el cual es matriz fundamental para la operación del sistema de trasiego de manera automática:

3.2.5.2.5 Secuencia de Operación:

- 1: Se abre la válvula V(1) al 30% por un periodo de 60 seg. Para iniciar la purificación en la red de trasiego.
- 2: Si se obtiene pureza mayor o igual a 99% de O₂ en la red, se cierran las válvulas V(2) y V(3).
- 3: 3.0 seg. Después se abre V(4) e iniciar la recirculación del producto sin purgas.
- 4: 5.0 seg. Después incrementamos la apertura de la válvula V(1) hasta el 100% (razón = 5%) para acelerar de manera proporcional el ciclo de enfriamiento.
- 5: Arranca la Bomba Criogénica (Bc) cuando la temperatura ha alcanzado un valor equivalente a niveles criogénicos. Cerrando la Válvula V(4) y abriendo la válvula V(5) hasta obtener el Peso Seteado.
- 6: Una vez que se obtiene la transferencia de producto, se para la Bomba Criogénica (Bc) y se cierra la válvula V(1).
- 7: Nuevamente se abre la Válvula V(4) por un periodo de 5.0 seg.
- 8: Retorna a Condiciones Iniciales.

3.2.5.2.5.1 Alarmas:

1. Si la pureza es menor al 99% de O₂
2. Si la Presión de descarga de la bomba es mayor o igual a 275 psi.
3. Si el nivel del Tanque de 50k GAL. Es menor al 10%.

3.2.5.2.6 Simulación de Procesos

Los simuladores permiten realizar una evaluación rápida y confiable de diversos procesos, proporcionando información útil para el diseño conceptual y básico, así como el estimado del costo de los equipos. También, mediante ellos es posible analizar u optimizar diagramas de flujo, localizar restricciones (cuellos de botellas) y predecir el comportamiento de plantas existentes que pueden ser sometidas a diversas condiciones de operación, a fin de analizar las respuestas del proceso a estas modificaciones, proporcionando guías para una mejor operación.

En una simulación se requiere de la información necesaria sobre el proceso, corrientes y equipos de la planta que se desean simular. Se hace necesario planificar un muestreo de las corrientes influyentes del proceso, elaborar un registro diario de los datos operacionales y preparar un diagrama de flujo del proceso a simular. Generalmente, un simulador está organizado de tal forma que cada equipo, proceso físico o termodinámico está representado por un modelo matemático equivalente a un módulo de cálculo donde se efectúan los balances de materia y energía de cada equipo, de acuerdo a una secuencia indicada por el usuario o establecida automáticamente por el simulador.

Finalmente, se puede decir que un simulador es un programa que predice el comportamiento de un proceso a partir de un modelo adecuado previamente analizado, que incluye: ecuaciones de transferencia de calor, sistema termodinámico adecuado, modelos de propiedades de transporte y de las características de construcción del mismo. La exactitud con la cual el programa produce los resultados dependerá básicamente de la fidelidad de los modelos matemáticos y sus limitaciones teóricas, los métodos numéricos y la confiabilidad de los valores de las variables de entrada (White, 1998).

3.2.5.2.6.1 Descripción del Simulador de Procesos HYSYS

HYSYS es una herramienta que modela procesos para simulación en estado estacionario, diseño, supervisión de funcionamiento, optimización y planificación para negocios de producción de crudo, industrias de procesamiento del gas natural y refinación de petróleo. Proporciona una solución en modelo de procesos intuitiva e interactiva que permite crear los modelos en estado estacionario para diseño de una planta, supervisión de funcionamiento, localización de averías, etc.

Para funcionar con eficiencia máxima y proveer de conocimientos necesarios, la herramienta de un modelo en estado estacionario debe combinarse con el robusto poder de la ingeniería. HYSYS aporta las herramientas para simular procesos de las industrias de petróleo y gas en especial. Este simulador presenta las siguientes características:

- Ambiente Fácil de Utilizar en Windows

El DFP (Diagrama de flujo del proceso) suministra una representación gráfica clara y concisa del diagrama de proceso. Incluyendo características productivas tales como: cortar, copiar, pegar, auto conexión, entre otros.

- Extensos Fundamentos Termodinámicos

Asegura el cálculo exacto de propiedades físicas, propiedades de transporte y del comportamiento de fase para procesos de la industria del gas y refinación de petróleo. Contiene una extensa base de datos de componentes y la capacidad de agregar más componentes para ser utilizados.

- Conformidad con Active X (Automatización OLE)

Permite la integración de operaciones creadas por el usuario en la unidad, expresiones propias de las reacciones cinéticas y los paquetes de propiedades especializados. Interactúa fácilmente con programas como Microsoft Excel y Visual Basic.

- Comprensión de las Operaciones Unitarias

Incluye la destilación, reacciones, operaciones de transferencia de calor, equipos rotativos, operaciones lógicas en estado estacionario y ambiente dinámico. Diseño y Clasificación Detallado de los Intercambiadores de Calor.

Los usuarios opcionalmente pueden vincularse a las herramientas rigurosas del diseño y clasificación de los intercambiadores de calor, tales como: intercambiadores de tubos y carcasa, intercambiadores de pasos múltiples y enfriadores de aire.

- Evaluación Económica de Diseños de Procesos

Los modelos de simulación de HYSYS pueden realizar evaluaciones económicas para gerencias de proyectos de diseños de procesos. Esta tecnología es útil para operaciones unitarias, costos de los equipos y del proceso.

3.2.5.2.6.2 Estudio de las Condiciones que Generan La Vaporización del Oxígeno Líquido en el Sistema de Transporte a Través de La Red de Trasiego

Para conocer las razones que originan la pérdida de oxígeno se determinó el comportamiento del fluido dentro de la tubería que transporta el oxígeno líquido desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque transportable, utilizando para tal fin el simulador comercial de procesos Aspen Hysys en su versión 2006.5.

Se realizó un levantamiento en campo de la línea de transporte de oxígeno líquido y se establecieron las características operacionales y de construcción tales como presión, accesorios, longitudes, materiales y tipo de aislante, mediante observación directa e información suministrada por el personal que opera en el área de despachos de la planta.

Para obtener resultados confiables en el simulador, es necesaria la utilización del paquete termodinámico que mejor se ajuste a las características del sistema. Los paquetes de propiedades incorporados en HYSYS proveen predicciones precisas de propiedades termodinámicas, físicas y de transporte para hidrocarburo, no-hidrocarburo y fluidos químicos y producto petroquímicos. La base de datos consta de más de 1.500 componentes y más de 16.000 coeficientes binarios. Si un componente de la biblioteca no puede ser encontrado dentro de la base de datos, están disponibles métodos de estimación para crear completamente componentes hipotéticos definidos.

3.2.5.2.6.3 Selección del Paquete Termodinámico a Utilizar en el Simulador

El conocimiento del paquete termodinámico apropiado para simular este modelo es un punto fundamental de este estudio y por tal motivo se debe escoger el modelo matemático que describa con precisión las propiedades de las sustancias.

Tipo de Sistema	Paquete de Propiedades Recomendado
Deshidratación con TEG	PR
Agua Amarga	PR, Sour PR
Procesamiento criogénico	PR, PRSV
Separación de aire	PR, PRSV
Columnas de crudo atmosféricas	PR, PR Options, GS
Columnas al vacío	PR, PR Options, GS (<10 mm Hg), Braun K10, Esso K
Columnas de etileno	Lee Kesler Plocker
Sistemas con alto	PR, ZJ or GS (see T/P limits)
Sistemas de yacimientos	PR, PR Options
Sistemas de vapor	Steam Package, CS or GS
Inhibición de hidratos	PR
Sistemas químicos	Activity Models, PRSV
Alquilación de HF	PRSV, NRTL (Contactar a Hyprotech)
Deshidratación con TEG y aromáticos	PR (Contact Hyprotech)
Sistemas de hidrocarburos en donde la solubilidad de H ₂ O es importante.	Kabadi Danner
Sistemas con gases seleccionados e hidrocarburos livianos	MBWR

Tabla 25: Paquetes Termodinámicos Recomendados por el Fabricante del Software para Sistemas Típicos

3.2.5.2.6.3.1 Datos de Entrada al Simulador Hysys

Una vez determinado el paquete termodinámico se establecen los datos de entrada a la red de tuberías para su posterior montaje en el simulador, los cuales corresponden a informes de operación del sistema y valores de diseño de los equipos involucrados, los cuales se muestran en la tabla siguiente:

Condiciones	Normal	Mínimo	Promedio	Máximo
Flujo de O ₂ líquido m ³ /min	4.277,00	3.277,00	3.777,00	4.277,00
Presión de descarga del Tk. a la tubería	20			
Temperatura (°C)	0			

Tabla 26: Datos de Entrada para Simular el Comportamiento del Sistema - Red de Trasiego

Condiciones	Normal	Mínimo	Promedio	Máximo
Flujo de O ₂ líquido m ³ /min	4.277,00	3.277,00	3.777,00	4.277,00
Presión en la red de trasiego (Psig)	20			
Temperatura (°C)	-183			
Periodo (seg.)	300			

Tabla 27: Datos de Salida para Simular el Comportamiento del Sistema - Red de Trasiego

3.2.5.2.7 Simulación del Sistema de Trasiego Para Obtener la Curva de Refrigeración en Función a la Apertura de la Válvula Proporcional

Para la simulación de la tubería de Oxígeno líquido se tomaron las medidas obtenidas del levantamiento en campo. En los cálculos de transferencia de calor dentro de la tubería se debe considerar la vaporización en la misma, por lo tanto se utiliza el método de estimación del coeficiente convectivo de la transferencia de calor interna *Profes*, que es una correlación propia del simulador. También se consideró la transferencia de calor en la pared del tubo, al ambiente y la capa de aislante que recubre la tubería. La capa de aislante es espuma de poliuretano, la cual tiene un diámetro de 12 pulgadas, y posee una conductividad térmica de 0,0104 BTU/h.

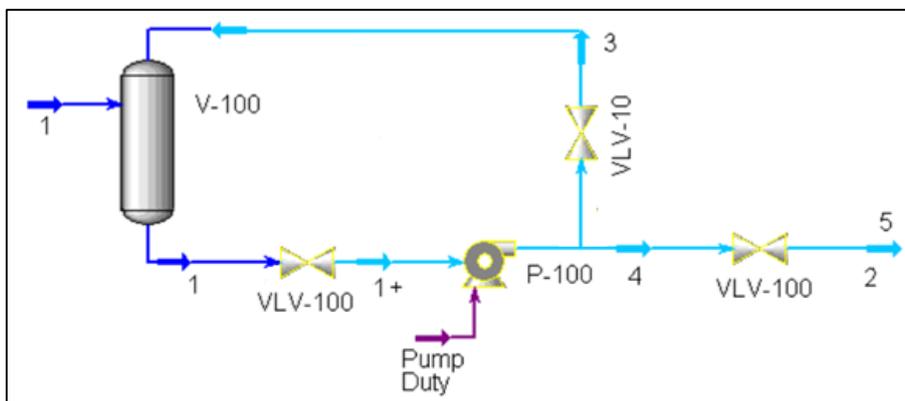


Figura 87: Proceso de Trasiego a Ser Simulado

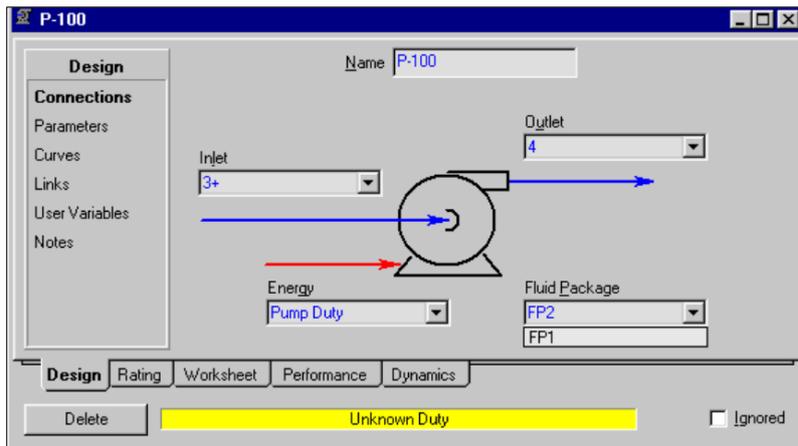


Figura 88: Configuración de la Bomba para el Uso Criogénico

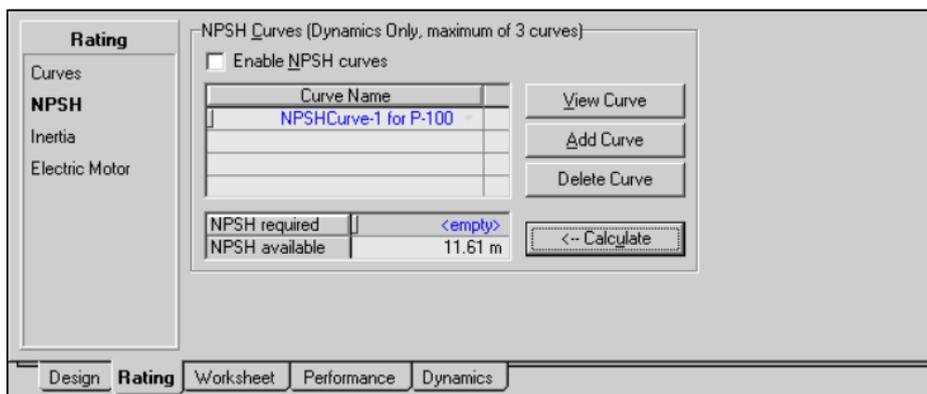


Figura 89: Configuración de carga para la succión NPSH

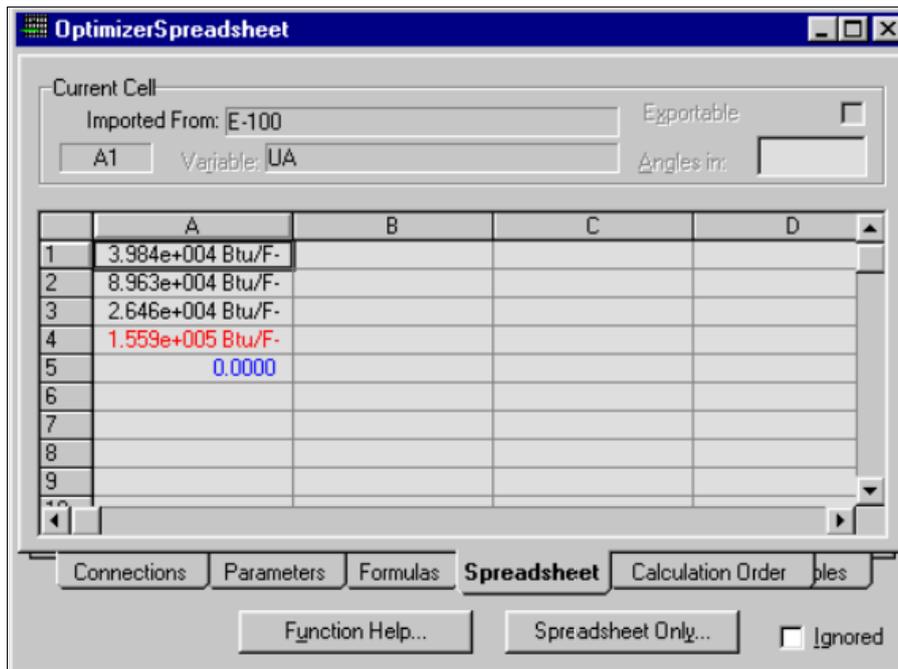


Figura 90: Configuración Respecto a la Capacidad Calorífica

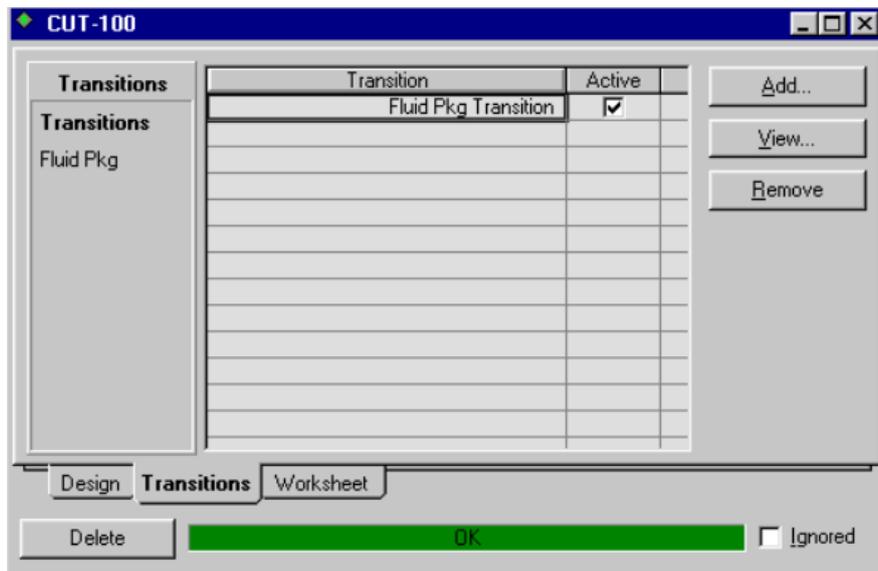


Figura 91: Compilación de la Aplicación

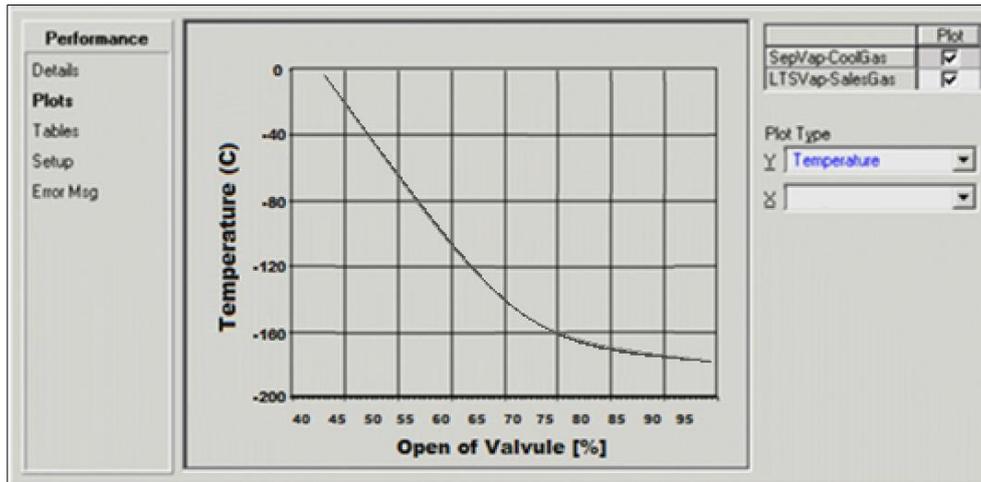


Figura 92: Comportamiento del Sistema en un Periodo Determinado en Función a la Apertura de la Válvula

Name	Feed	E-100 Cool In	Valve In	E-102 Cool In	E-100 Feed
Vapour Fraction	1.0000	0.8249	0.0000	0.0363	1.0000
Temperature [F]	20.00	-142.0	120.0	-87.93	20.00
Pressure [psia]	1000	250.0	350.0	251.0	1000
Molar Flow [lbmole/hr]	2745	1542	375.4	1640	1077
Mass Flow [lb/hr]	5.577e+004	2.674e+004	1.655e+004	5.907e+004	2.187e+004
Liquid Volume Flow [barrel/day]	1.156e+004	5961	2237	9086	4535
Heat Flow [Btu/hr]	-9.752e+007	-5.471e+007	-1.887e+007	-8.315e+007	-3.825e+007
Name	E-101 Feed	E-100 Out	E-102 Out	Mixer Out	E-101 Cool In
Vapour Fraction	1.0000	0.0000	0.3714	0.0342	0.5234
Temperature [F]	20.00	-65.00	-40.00	-47.19	-28.68
Pressure [psia]	1000	990.0	990.0	990.0	21.00
Molar Flow [lbmole/hr]	1668	1077	1668	2745	375.4
Mass Flow [lb/hr]	3.389e+004	2.187e+004	3.389e+004	5.577e+004	1.655e+004
Liquid Volume Flow [barrel/day]	7027	4535	7027	1.156e+004	2237
Heat Flow [Btu/hr]	-5.927e+007	-4.105e+007	-6.224e+007	-1.033e+008	-1.887e+007
Name	E-100 Cool Out	E-102 Feed	E-101 Cool Out	E-102 Cool Out	** New **
Vapour Fraction	1.0000	0.8456	1.0000	0.1583	
Temperature [F]	-21.68	-13.30	-30.84	-56.17	
Pressure [psia]	240.0	995.0	20.00	246.0	
Molar Flow [lbmole/hr]	1542	1668	375.4	1640	
Mass Flow [lb/hr]	2.674e+004	3.389e+004	1.655e+004	5.907e+004	
Liquid Volume Flow [barrel/day]	5961	7027	2237	9086	
Heat Flow [Btu/hr]	-5.191e+007	-6.067e+007	-1.747e+007	-8.158e+007	

Figura 93: Tabla de Compilación del Sistema

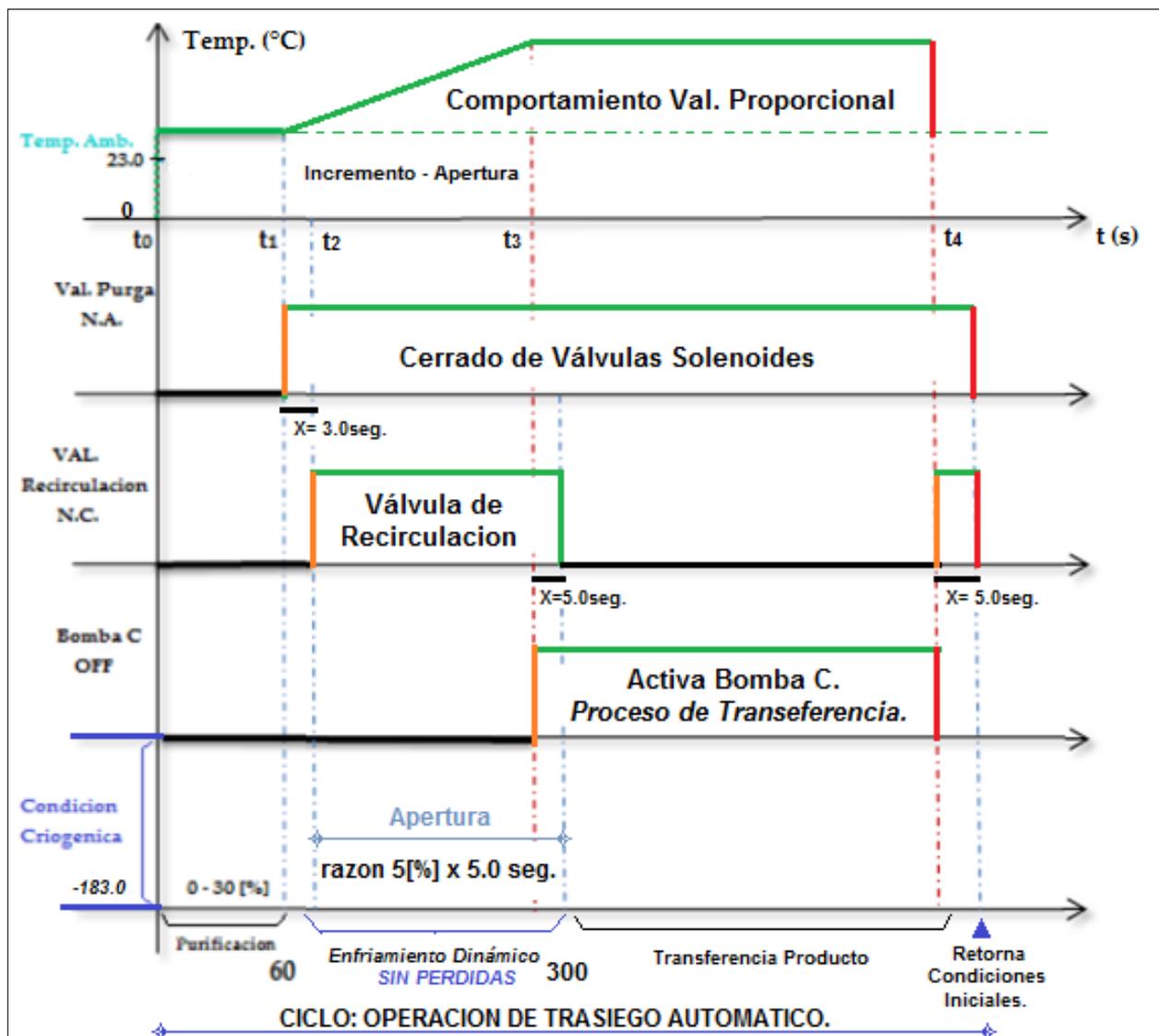


Figura 94: Ciclos de Operación en Secuencia del Sistema de Trasiego Automático

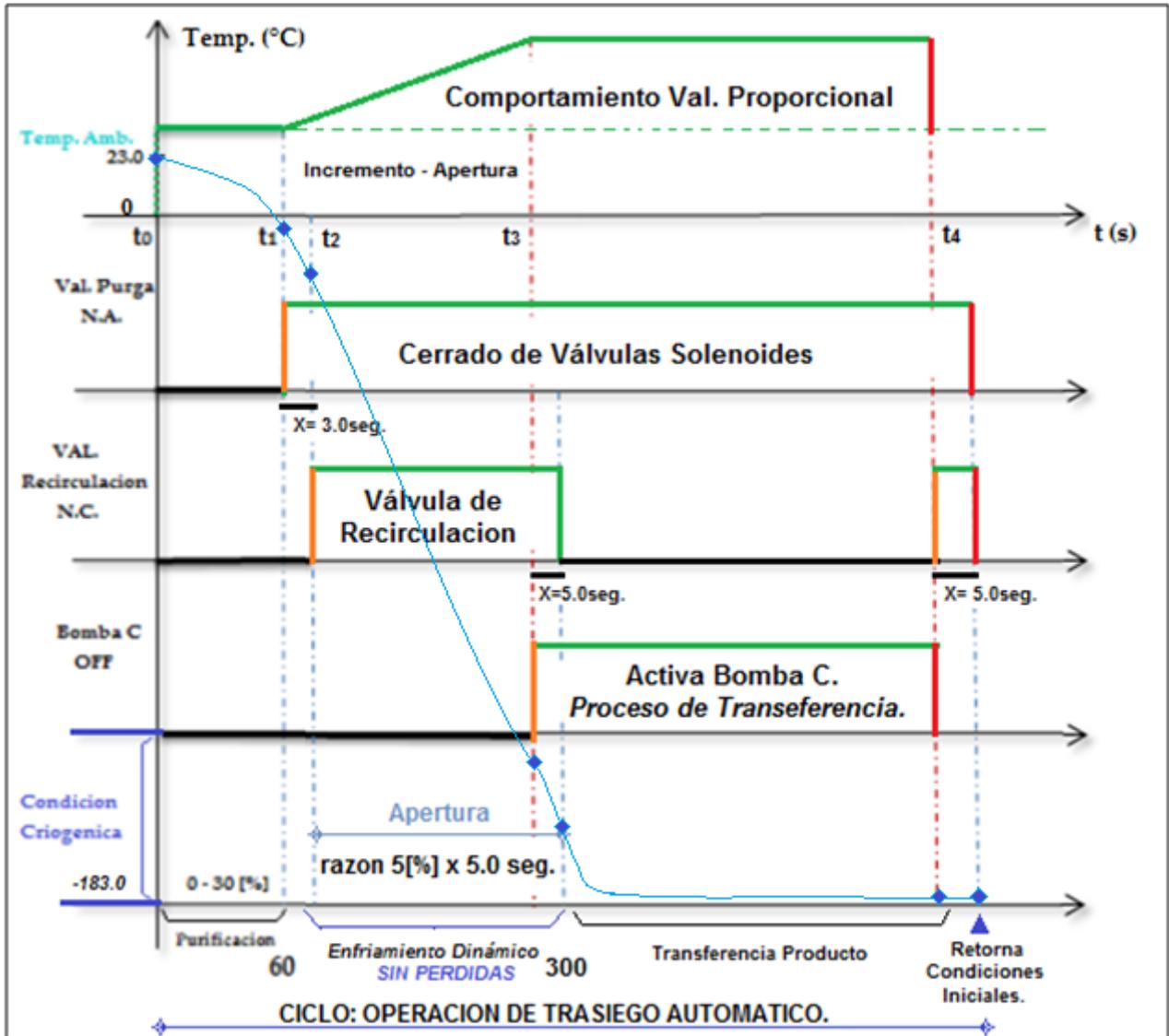


Figura 95: Comportamiento de la Temperatura del Sistema de Trasiego Automático Respecto a los Ciclos de Operación en Secuencia

3.2.5.2.8 Integración de Señales al Sistema de Control

3.2.5.2.8.1 Arquitectura de Control Basado en el Sistema Apacs

El sistema de control con el que cuenta la planta es de perfil escalable que me permite la modificación, optimización de subprocesos con la finalidad de poder mejorar recursos para una producción más eficiente.

Para llegar a una congruencia en el diseño de control automático para la mejorara de la eficiencia en el proceso de trasiego del área de despacho de oxígeno líquido de la compañía, se presenta y expone un sistema de control integral que nos permite un sistema más confiable

3.2.5.2.8.1.1 Visión General

El APACS es un sistema homogéneo y coherente que se caracteriza por una extraordinaria arquitectura escalable, formando así la base ideal para la implementación rentable de una instalación en instrumentación y control.

Esto se materializa en las siguientes ventajas:

- Sistema de automatización integral
- Altamente flexible y escalable
- Seguridad en todos los niveles
- Conjuga performance DCS clásicos con simplicidad otros sistemas
- Involucra: programación, controladores, redes industriales, redes informáticas.
- Altos costos

➤ Hardware

Para la parte estructural presenta:

- Estructura modular: rack, módulos
- Buses de comunicación: ModulNet, ModulBus, IOBus, Ethernet, ModBus, Hart, FieldBus, ProfiBus

➤ Software

Ofrece la máxima funcionalidad y un interfaz de usuario fácil de usar.

- S.O: Windows NT (95), Unix
- Supervisión: Wonderware Process Suite (Vision)
- Control: 4-Mation

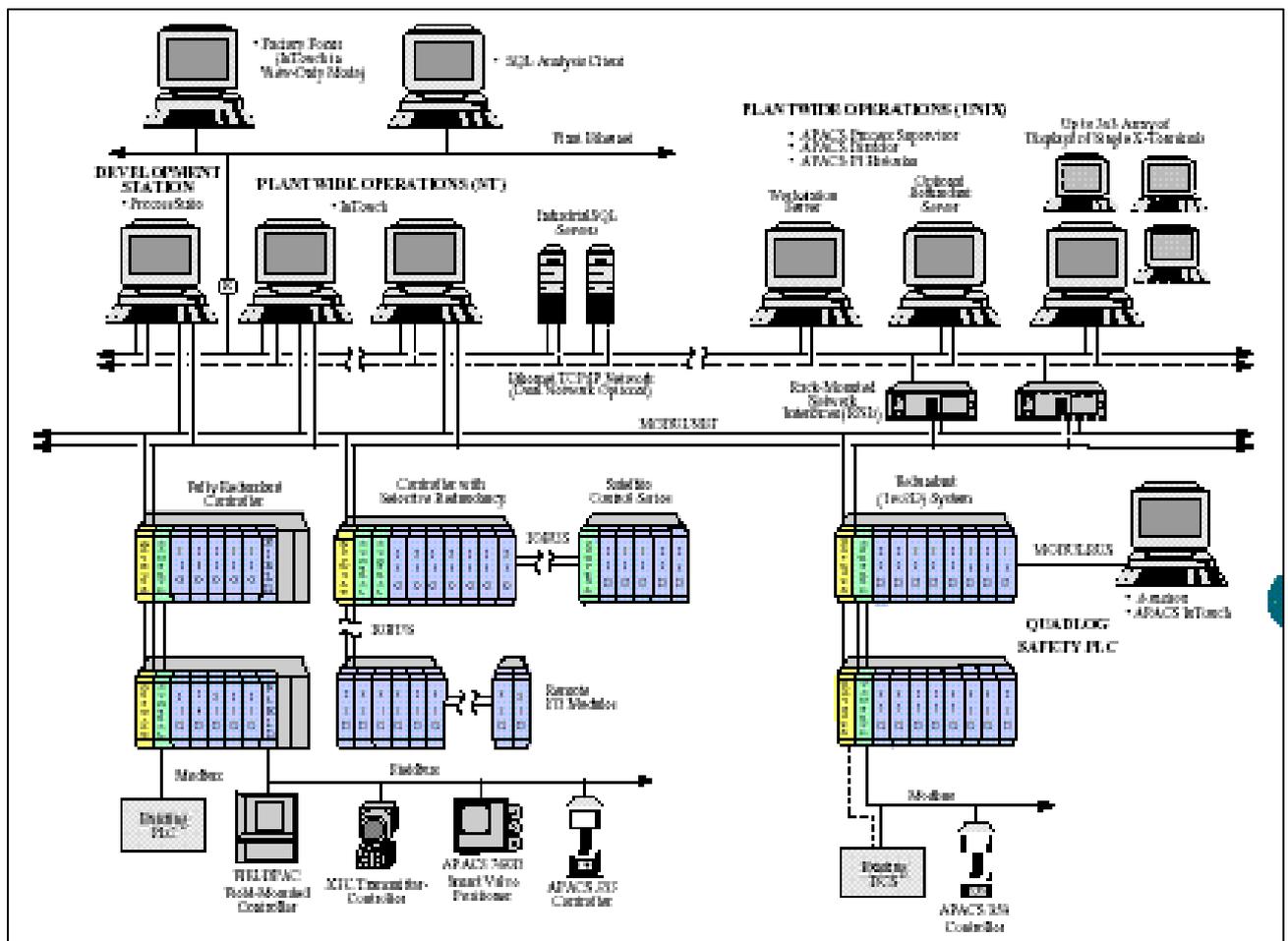


Figura 96: Arquitectura de Control

3.2.5.2.8.1.2 Fundamentos

Tiene la ventaja de apertura absoluta tanto en el entorno de oficina y de producción. Una base de procesos integrados

➤ PLC

- Controlador de Lógica programable.
- Estructura compacta, modular.
- E/S Discretas, Analógicas, Especiales
- Diseñado inicialmente procesos manufactura
- Lenguajes de Programación: NORMA IEC 1131
- Comunicación abierta
- Costos accesibles
- Variantes: Safety PLC
- Fabricantes: Schneider, Allen Bradley, Siemens, General Electric, etc.

➤ DCS

- Sistema de control distribuido.

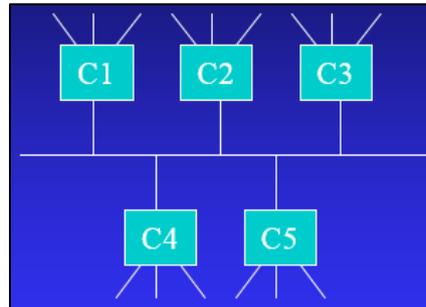


Figura 97: Sistema de Control Distribuido

- E/S Discretas, Analógicas, Especiales



Figura 98: E/S Discretas, Analógicas, Especiales

- Diseñado inicialmente para procesos continuos



Figura 99: Procesos Continuo

- Comunicación medianamente abierta

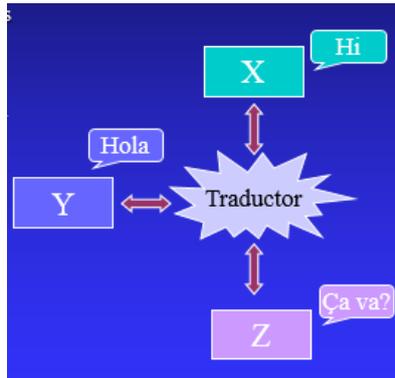


Figura 100a: Comunicación Medianamente Abierta



Figura 100b: Comunicación Medianamente Abierta

- Lenguajes de Programación: NORMA IEC 1131

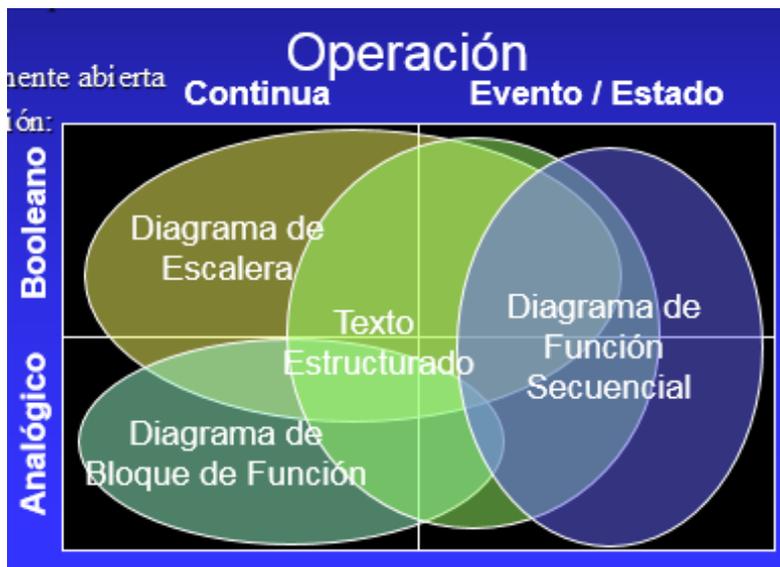


Figura 101: NORMA IEC 1131

- Altos costos

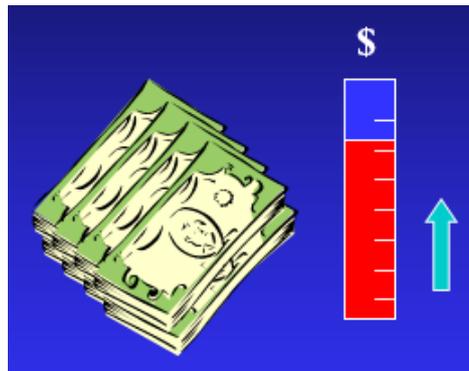


Figura 102: Altos Costos

- Altamente seguros

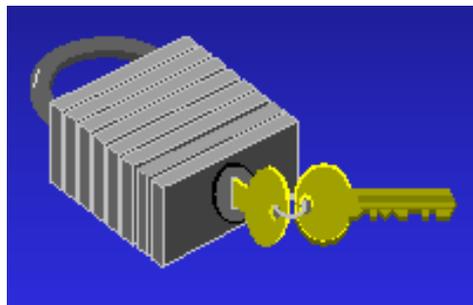


Figura 103: Altamente Seguros

- Naturaleza redundante

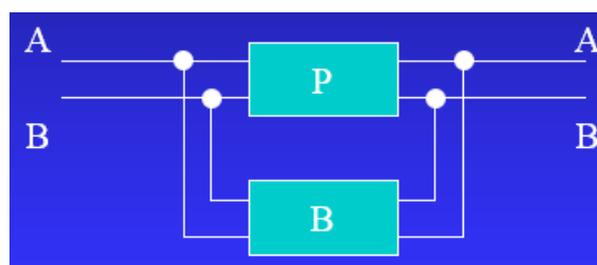


Figura 104: Naturaleza Redundante

- Fabricantes: Bailey, Siemens-Moore, Allen Bradley, Yokogawa, etc.



Figura 105: Fabricantes

➤ HMI

- Interfaz Hombre Maquina
- Anteriormente: MMI
- Nivel de Supervisión
- Independiente del sistema de control
- Programación: Gráfica, Scripts
- Fabricantes: Wonderware, Rockwell, etc.

➤ PIRÁMIDE AUTOMATIZACIÓN

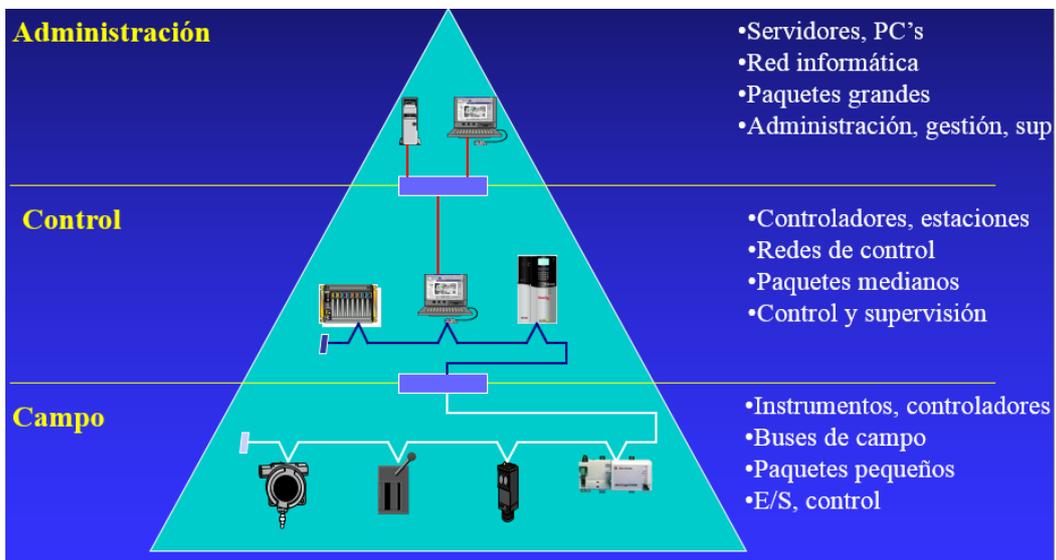


Figura 106: Pirámide de Automatización

3.2.5.2.8.1.3 Descripción

Su Arquitectura de automatización integral, esta basado en un sistema de control híbrido DCS - PLC de alto rendimiento y fácil configuración

➤ CARACTERISTICAS

- Redundancia
- Robusto
- Altos costos
- Comunicación cerrada
- Escalable
- Facilidad configuración

➤ SISTEMA

- Nivel de supervisión
 - Wonderware Process Suite
 - ✓ Window Maker
 - ✓ Window Viewer
 - ✓ SQL
 - ✓ DDE
 - ✓ OPC
 - ✓ ActiveX
 - Componentes de Hardware
 - ✓ Servidores
 - ✓ Estaciones de operación
 - ✓ Hubs
 - ✓ Impresoras
 - ✓ Tarjetas de red redundantes

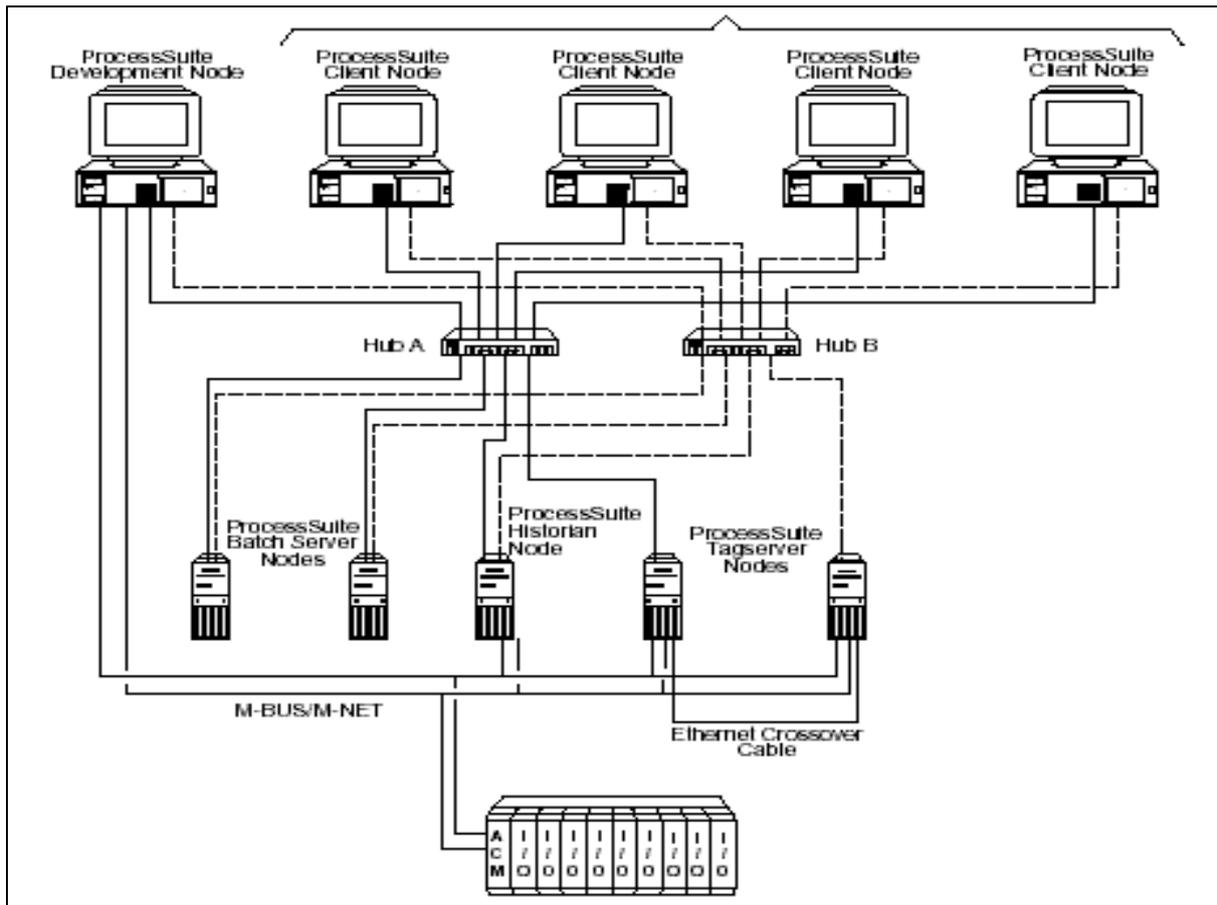


Figura 107: Componentes del Hardware

- Driver de comunicación
- ✓ Software
- ✓ Leen datos de tarjeta
- ✓ Interpretan señales de campo

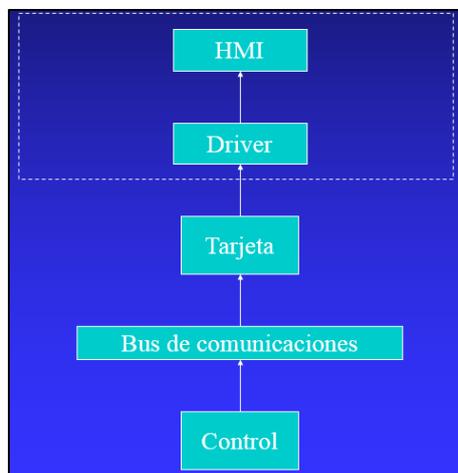


Figura 108: Driver de Comunicación

- Herramientas de Software
 - ✓ Prosess Suite Vision
 - ✓ Prosess Suite Historian
 - ✓ Prosess Suite Batch
 - ✓ PC Anywhere

- Red Ethernet TCP/IP
- S.O: Windows NT (95), Unix
- Integración ERP

- Nivel de Control
 - Híbrido DCS - PLC
 - Componentes de hardware
 - ✓ Estaciones de Ingeniería



Figura 109: Estación de Ingeniería

- ✓ Rack

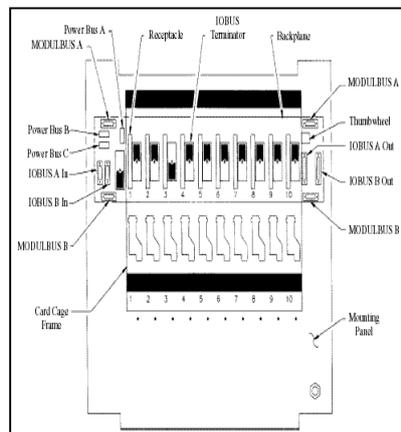


Figura 110: Rack

- ✓ Tarjetas Controladoras



Figura 111: Tarjetas Controladoras

- Lenguajes de programación
 - ✓ BD : Diagrama de Bloques
 - ✓ LD : Escalera
 - ✓ SFC: Esquema de Flujo Secuencial
 - ✓ ST : Texto Estructurado
- Herramientas de software
 - ✓ 4-Mation
 - ✓ Logger
 - ✓ DataBase
 - ✓ Control Simulator
- Red MBus (ModulBus)
- Nivel de Campo
 - Módulos distribuidos
 - Componentes de hardware
 - ✓ Gabinetes
 - ✓ Racks
 - ✓ Tarjetas
 - E/S
 - Especiales
 - ✓ Módulos toma datos

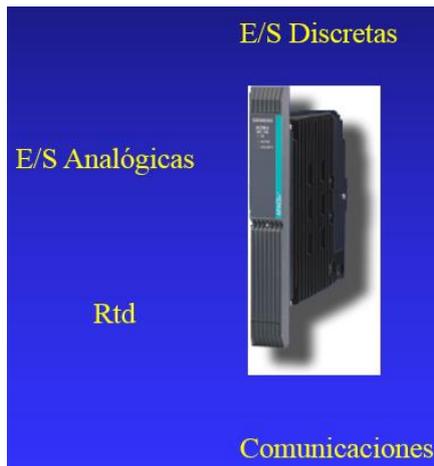


Figura 112: Módulos Toma Datos

- Herramientas de software (4-Mation)
- Red IOBus (Input Output Bus)

- Redes Industriales
 - Ethernet
 - ModulNet
 - ModulBus
 - IOBus
 - ModBus
 - Profibus
 - Hart

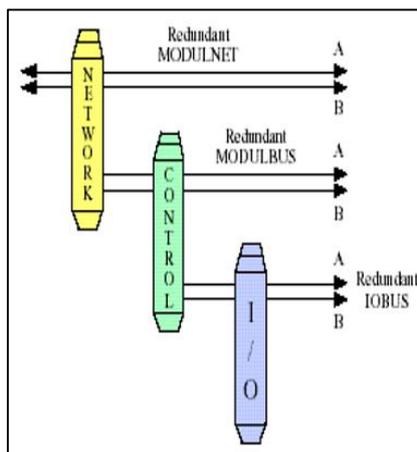


Figura 113: Redes Industriales

3.2.5.2.8.1.4 Aplicación

- Resumen
 - 8387 variables total
 - 3163 variables (tag)
 - 4 gabinetes
 - 1 Estación de operadores
 - 1 Estación de Ingeniería
 - 2 módulos ACM+ redundantes
 - SO: Windows NT 4.0
 - 2 Servidores Compaq
- Componentes

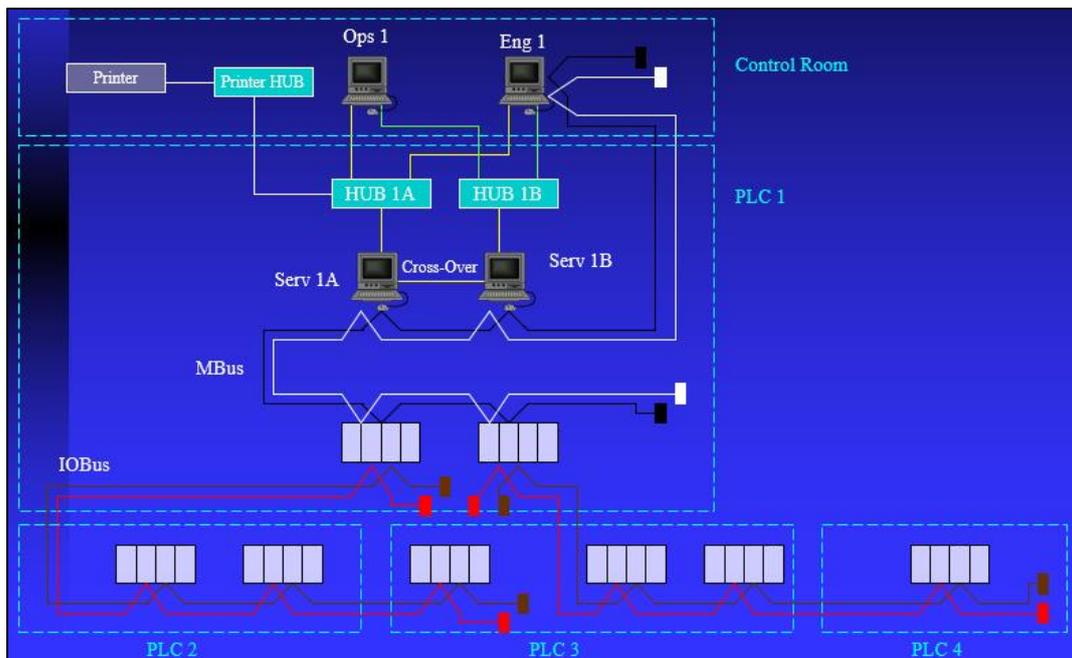


Figura 114: Componentes

- Puntos débiles
 - ACM1 sobrecargado
 - ✓ Retardos en sistema
 - ✓ Pérdida de señales
 - ✓ Pérdida en comunicaciones:
 - Entre ACM

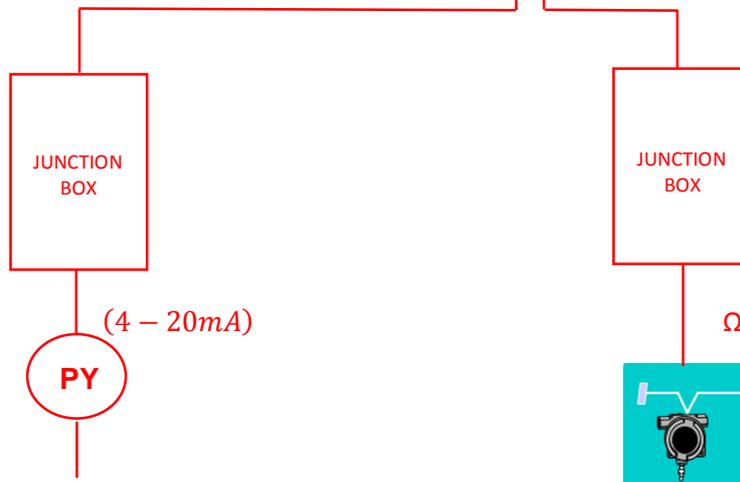
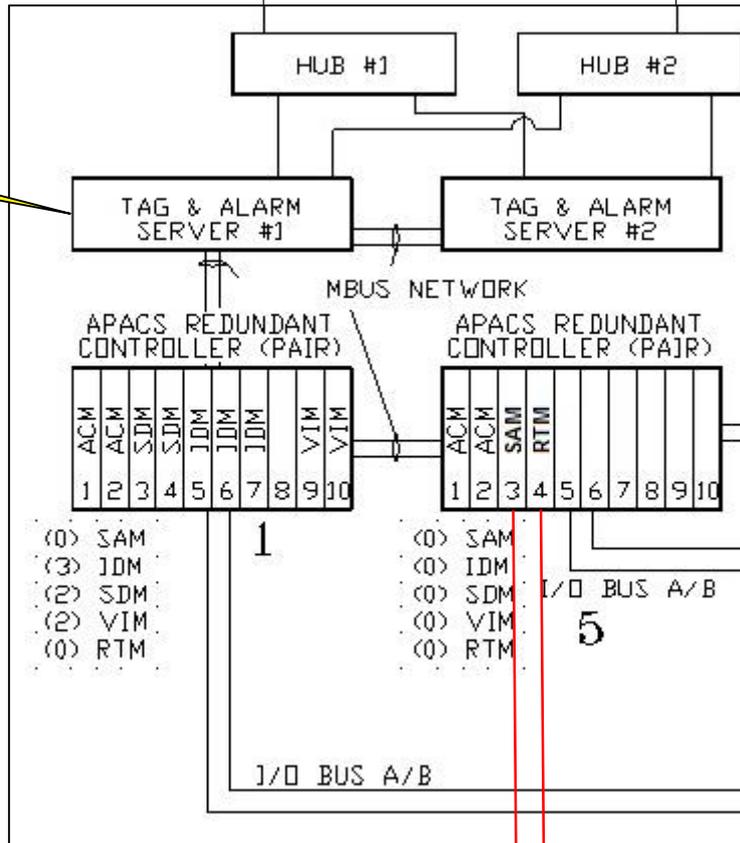
- En redes de comunicación
 - Falta redundancia estación ingeniería
 - Cableado inapropiado para red Ethernet
 - Posibles fallos de hardware en estaciones de Ingeniería y Operadores

ESTACIÓN OPS1

ESTACION ENG1



SERVIDORES A Y B



Actuador de la Válvula

Figura 115: Esquema a Implementar

PT-1000

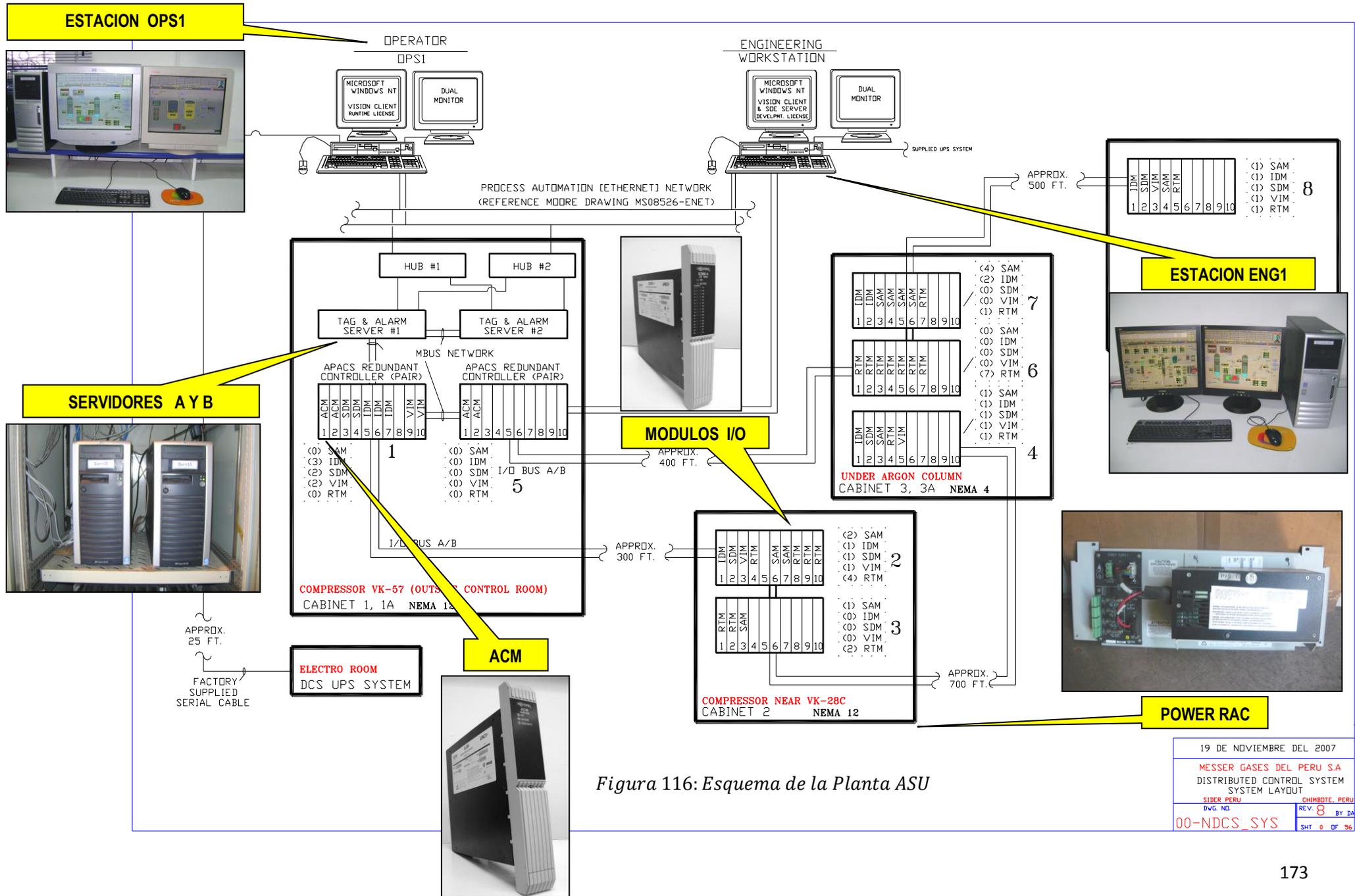


Figura 116: Esquema de la Planta ASU

19 DE NOVIEMBRE DEL 2007	
MESSER GASES DEL PERU S.A DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM SYSTEM LAYOUT	
SIDER PERU DWG NO.	CHIMBOTE, PERU REV. 8 BY DA
00-NDCS_SYS	SHT 0 OF 56

3.2.6 Técnicas de Análisis de Datos

3.2.6.1 Red de trasiego sistema estructural

RED DE TRASIEGO - SISTEMA ESTRUCTURAL			
MATERIALES	CANTIDAD (UND)	PRECIO UNITARIO (S/.)	PRECIO TOTAL (S/.)
Tuberías de cobre de 1 ½"Ø	10	286	2860
Codos de cobre de 1 ½"Ø a 1 ½"Ø de 90°	12	35	420
T de cobre 1 ½"Ø	1	45	45
COTIZACION DE CONSTRUCCIÓN			
En base al aislamiento térmico	-----	-----	28000
Costo Total de la Red de Trasiego – Sistema Estructural			31325

3.2.6.2 Costo de equipos

COSTO DE EQUIPOS			
EQUIPOS	CANTIDAD (UND)	PRECIO UNITARIO (S/.)	PRECIO TOTAL (S/.)
Válvula solenoide ASCO con actuador - serie: 8202GH	4	2145	8580
Válvula de control FISHER – serie: 657	1	57200	57200
Posicionador neumático inteligente METSO - serie: 3582i	1	14300	14300
Sensor de temperatura PT-1000 (RTD) con termo pozo SENSE	1	1716	1716
Bomba criogénica TURBOCOMPRESSOR de 40HP	1	42900	42900
Analizador TELEDYNE 3010MA1	1	71500	71500
COTIZACION DE ENSAMBLAJE			
Costos de instalación y montaje - Instrumentación	-----	-----	42900
Costos de instalación y montaje – Mecánico	-----	-----	8580

PERSONAL DE INGENIERIA Y DESARROLLO			
Director del proyecto (Periodo: 2 meses)	1	12000	24000
Supervisor de ingeniería (Periodo: 2 meses)	1	4500	9000
Asistente de ingeniería (Periodo: 2 meses)	1	2200	4400
Costo Total de Equipos			285076
COSTO TOTAL DEL RPOYECTO			3161

Las inversiones necesarias para mantener en marcha el proyecto una vez finalizada está destinado a:

➤ Mano de obra

Como mano de obra serán considerados:

- Los costos de instalación y montaje - instrumentación
- Costos de instalación y montaje – Mecánico, ello incluye lo siguiente:
 - ✓ Sueldos
 - ✓ Alimentación
 - ✓ Atención a trabajadores
 - ✓ Costo Total : 51 480 S/. x 2 meses

➤ Costo de Materiales

Está relacionado a los materiales a utilizar en el proyecto como:

- Tuberías de cobre de 1 ½"Ø
- Codos de cobre de 1 ½"Ø a 1 ½"Ø de 90°
- T de cobre 1 ½"Ø
- Aislamiento térmico
- Costo Total : 31 325 S/.

➤ Costo de Instrumentos

Está relacionado a los instrumentos que utilizaremos para la automatización tales como:

- Válvula solenoide ASCO con actuador - serie: 8202GH
- Válvula de control FISHER – serie: 657
- Posicionador neumático inteligente METSO - serie: 3582i
- Sensor de temperatura PT-1000 (RTD) con termo pozo SENSE
- Bomba criogénica TURBOCOMPRESSOR de 40HP
- Analizador TELEDYNE 3010MA1
- Costo Total : 196 196 S/.

➤ Personal de Oficina Técnica

Está conformado por:

- Director del proyecto
- Supervisor de ingeniería
- Asistente de ingeniería
- Costo Total : 37400 S/. x 2 meses

1. Rentabilidad

a. Valor Presente Neto Acumulado VPNA.

El Valor Presente Neto Acumulado es el VPN de los n primeros años de vida del proyecto, en otras palabras es el VPN de los flujos comprendidos desde el año 0 hasta el año n inclusive. El VPNA muestra el comportamiento o evolución de la rentabilidad del proyecto con el tiempo.



Figura 117: Rentabilidad

En la figura se aprecia el progreso de la rentabilidad económica VPNA con el transcurso de los años, se observa que el VPNA es negativo hasta el año 2 en promedio, después es positivo, lo que quiere decir que recién después del año 3 se genera rentabilidad.

b. Punto de Equilibrio

Se entiende por un punto de equilibrio al volumen que es necesario comercializar para no incurrir ni en pérdidas ni en ganancias.

Por definición:

$$\text{UTILIDAD}(U) = \text{INGRESOS}(I) - \text{COSTOS}(C)$$

V_0 : Volumen de ventas mínimos para $I = C$.

En el punto de equilibrio: $I = C$.

Luego:

$$p \times V_0 = CF + CV$$

$$V_0 = \frac{CF+CV}{p} = \frac{\text{Costos totales}}{p}$$

Es útil determinar los puntos de equilibrio por cuanto determina los puntos de nivelación; es decir, aquellos valores para los cuales el proyecto comienza a dar utilidades.

Cuanto más bajo es este nivel, tanto más atractivo será el proyecto en estudio y menor el riesgo que se afronta.

Como se muestra en la tabla 33 los puntos de equilibrio están muy por debajo de las cantidades disponibles, siendo para este análisis un proyecto aceptable.

c. Relación Beneficio/Costo (B/C)

La relación beneficio/costo se calcula de la siguiente manera:

$$B/C_{TD} = \frac{VP \text{ Ing}}{VP \text{ Egr}} = \frac{\sum \text{Ing}_j / (1+TD)^j}{\sum \text{Egr}_j / (1+TD)^j}$$

$$VP \text{ Ing} = 337\,402.00$$

$$VP \text{ Egr} = 113\,777.00$$

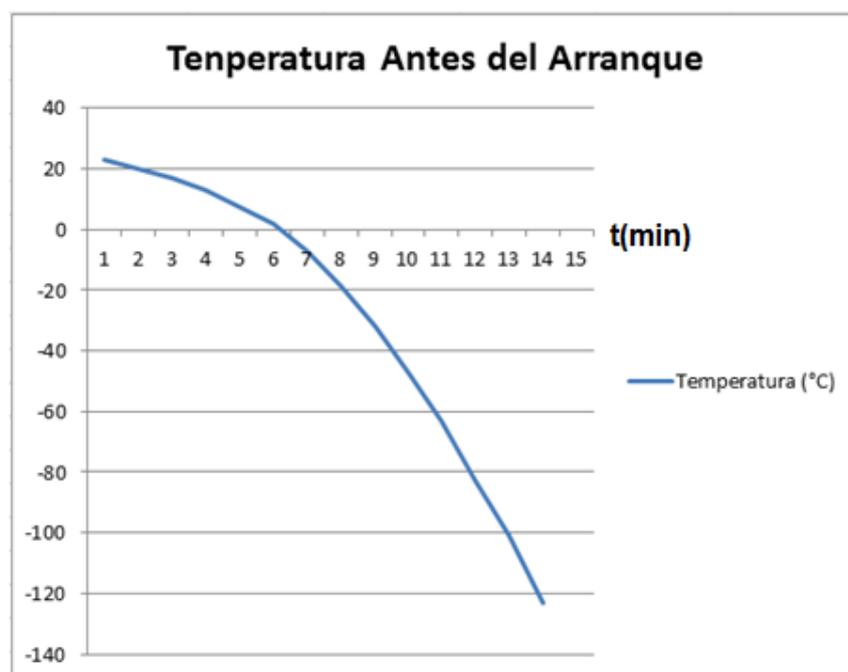
$$\text{Relación B/C} = 2,97$$

Al resultar la relación B/C mayor que 1,0; se concluye que el proyecto es rentable

- Análisis de Costos

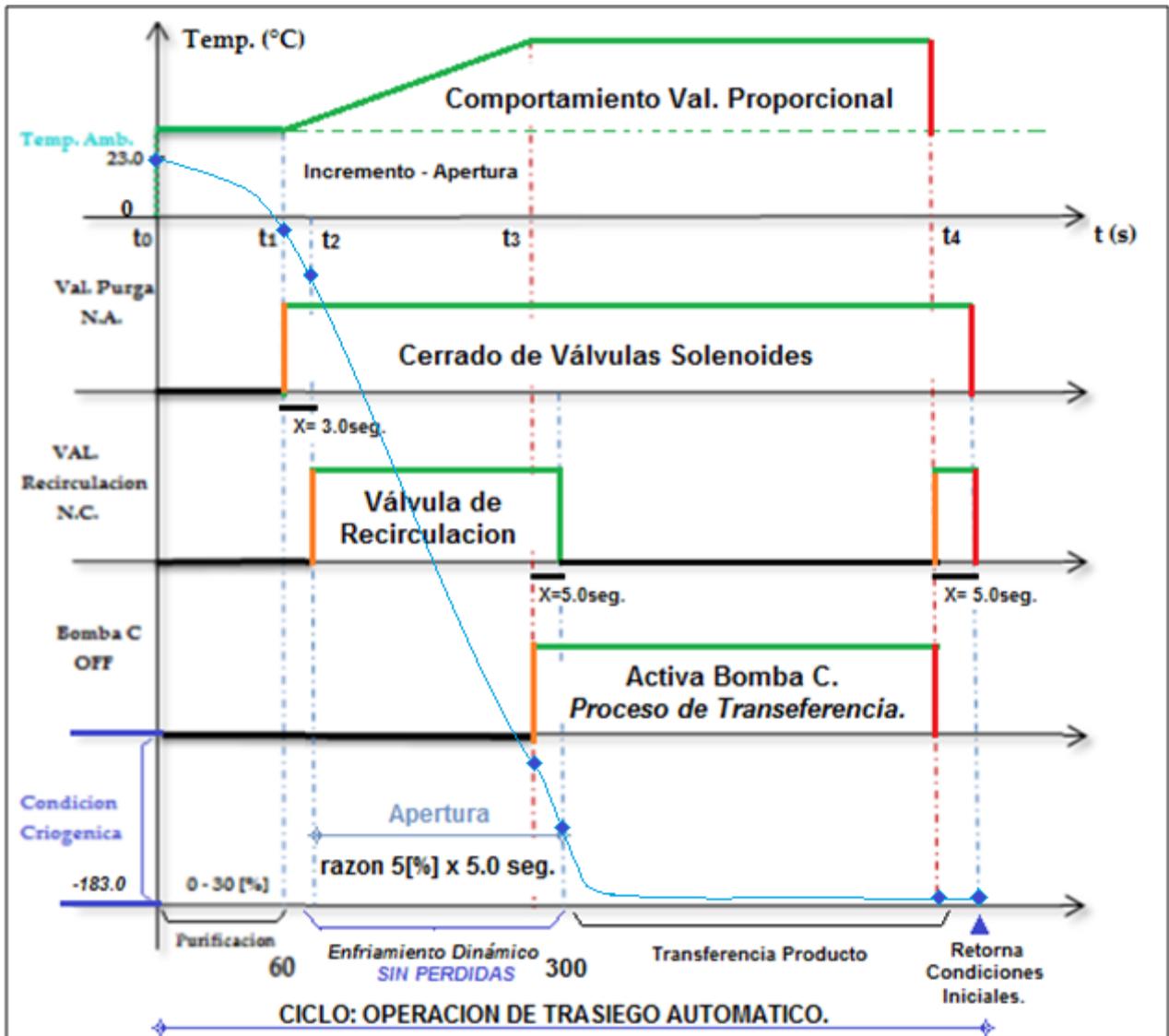
MATERIALES	3 325 S/.
CONSTRUCCIÓN	31 325 S/.
EQUIPOS	196 196 S/.
ENSAMBLAJE	51 480 S/.
OFICINA TECNICA	37 400 S/.
COSTO TOTAL DEL PROYECTO	316 401 S/.

- Representación característica del sistema en forma manual.



Temperatura Vs Tiempo

- Representación del sistema en forma automática



Comportamiento de la Temperatura del Sistema de Trasiego Automático Respecto a los Ciclos de Operación en Secuencia

- Trabaja con equipos que tienen que ser controlados manualmente.
- El operador se expone a condiciones potenciales de riesgo.
- Por ser un sistema manual, la supervisión se realiza una vez al día, se puede calificar que el control es ineficiente y no se tiene datos instantáneos del proceso.
- Los requerimientos hacen que se tenga un sistema de control en lazo cerrado ya que se necesita controlar el sistema de trasiego con el objetivo de reducir al mínimo las pérdidas, así mismo la integración de señales al sistema DCS de la planta para un entorno más confiable.
- La representación dinámica en el diseño del sistema automático hace que el operador pueda trabajar de manera amigable realizando el control y supervisión desde una central de control.
- El monto considerado en la propuesta económica está acorde al mercado, si bien es un costo elevado, tiene como beneficio la mejora de la operación de trasiego y a la vez evitar los riesgos a los que se exponía los operadores.

Las conclusiones son las siguientes:

- Se diseñó un sistema de control que cumple con los requerimientos del proceso.
- Se Diseñó un sistema de control, seguro, amigable y confiable en donde el operador realiza las distintas operaciones de manera fácil.
- Se diseñó el diagrama P&ID del proceso.
- Se realizó una adecuada selección de instrumentos de acuerdo a los requerimientos del sistema para que en conjunto sea integrado a un sistema DCS.

Las recomendaciones a tener en cuenta son las siguientes:

- Tener en cuenta las normas NEMA e IP correspondientes, para la selección de los equipos con los que se implementará el diseño.
- Se recomienda que al poner en práctica el sistema de forma automática se debe tener en consideración una inducción de los operadores con la finalidad de que puedan identificar puntos críticos.
- Al realizar la instrumentación se recomienda analizar bien el proceso y con la ayuda de los manuales realizar la adecuada selección de instrumentos.

VIII
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros:

[Libro 01]: ANTONIO Creus Solé. (2005). Instrumentación Industrial. (7ma Edición). España: Editorial Marcombo.

[Libro 02]: CARLOS A. Smith, ARMANDO B. Corripio. (1991). Control Automático de Procesos. (1era Edición). México. Editorial Limusa.

[Libro 03]: KATSUHIKO Ogata. (1998). Ingeniería de Control Moderna. (3era Edición). México: Editorial Prentice Hall.

[Libro 04]: Cao, E. (2004). "Transferencia de Calor en Ingeniería de Procesos". Primera Edición. Argentina.

[Libro 05]: Geankoplis, C. (1998). "Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias", Tercera Edición, Continental S.A. México.

[Libro 06]: Holman, J. (1998). "Transferencia de Calor". Octava Edición, McGraw-Hill. España,

[Libro 07]: Incropera, F. y De Witt, D. (1999). "Fundamentos de Transferencia de Calor". Cuarta Edición, Prentice Hall Hispanoamericana S.A. México.

[Libro 08]: Kirk, O. (1999). "Enciclopedia Temática de Química". Tomo 2. Editorial Limusa. Grupo Noriega Editores, México.

[Libro 09]: Linde, (1978). "Manual de Operaciones de la Planta Separadora de Aire PSA IV", Firma: Linde.

[Libro 10]: Perry, R. (1998) "Manual del Ingeniero Químico". Sexta Edición, McGraw-Hill. España.

Enlaces Web:

[Web 01]: Página web de la Empresa Messer Gases del Perú S.A

<http://www.messergroup.com/pe/index.html?iLangID=1>

[Web 02]: Introducción a la Instrumentación

<https://topicoselectronica.files.wordpress.com/2014/02/instrumentacion-normas-y-simbologia.pdf>

[Web 03]: Profibus

https://www.google.com.pe/webhp?sourceid=chromeinstant&ion=1&espv=2&es_th=1&ie=UT F-8#q=red%20profibus

[Web 04]: Concepto de Trasiego.

<http://es.thefreedictionary.com/trasiego>

[Web 05]: Concepto de Tanques Criogénicos

[http://www.linde-healthcare.com.ec/international/web/lg/ec/like35lglqtec.nsf/repositorybyalias/pdf_instaltangues/\\$file/3%20%20Tanques%20y%20terminos%20criog%C3%A9nicos.pdf](http://www.linde-healthcare.com.ec/international/web/lg/ec/like35lglqtec.nsf/repositorybyalias/pdf_instaltangues/$file/3%20%20Tanques%20y%20terminos%20criog%C3%A9nicos.pdf)

[Web 06]: Concepto de Bombas Criogénicas

http://www.tradefin.com.ar/newsite/wp-content/uploads/2012/07/Bombas_Criogenicas_Centrifugas.pdf

[Web 07]: Válvulas Criogénicas

<http://gameco.com.au/files/10.pdf>

[Web 08]: Variadores de Velocidad

http://www.schneider-electric.com.ar/documents/recursos/myce/capitulo04_1907.pdf

[Web 09]: Termocuplas

<http://es.scribd.com/doc/137262623/Sensores-y-Transmisores-1-ppt>

[Web 10]: Nitrox C.A., "Hoja de Seguridad del Material". (2007)

<http://www.gruonotrox.com.ve/seguridad>

[Web 11]: Air Liquide, (2009). "Enciclopedia de Gases".

<http://www.encyclopedia.airliquide.com/enciclopedia.asp?languageid=9>

[Web 12]: Gases Industriales del Este C.A. (2010) "Productos".

<http://www.gasesindustriales.com.ve/>

[Web 13]: AGA, "Hoja de Seguridad del Material (MSDS): Nitrógeno Líquido", Marca: Lince Gas, AGA. (2005).

<http://www.aga.com.co>

[Web 14]: Bombas Criogénicas

http://www.acdcom.com/downloads/acd_tc50.pdf

[Web 15]: Actuador Neumático

<http://worcestervalbol.blogspot.com/2014/01/actuadores-neumaticos-rotativos.html>

ANEXOS

[Anexo 01]: Matriz de identificación de riesgos a las que está expuesto el operador diariamente.

MATRIZ DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE LA OPERACIÓN DE TRASIEGO						
RIESGO	ANÁLISIS DE RIESGO				MEDIDA	
	PROBABILIDAD	IMPACTO	TIPO/IMPACTO	NIVEL	ACTUAL	SUGERIDO
ORIGINADO DURANTE LA OPERACIÓN DE TRASIEGO						
Caída y/o derrame del producto (LOX).	E	4	P/II/E	II	Se verifica periódicamente el procedimiento de carga de líquidos criogénicos. Se verifica procedimiento manipulación de líquidos criogénicos	Realizar un simulacro de derrame de material peligroso LOX en la zona de carga (trasiego)
Quemadura causada por liquido criogenico	D	4	P	II	Se llevan a cabo periodicamente capacitaciones respecto a manipulacion de liquidos criogenicos	Procedimiento a establecer el mecanismo que de a conocer al personal las prácticas de emergencia en caso de sufrir quemaduras Criogénicas
Caída y/o derrame de material peligroso de la unidad (combustible, aceite, grasa, etc.)	B	3	P/I	I	Se realiza el mantenimiento preventivo de las unidades en las fechas programadas e inspeccion de las mismas	Realizar un plan de simulacro de derrame de combustible y aceites en a zona de carga y desocarga
Lesiones durante la operacion (golpes y contusiones)	D	2	P	I	Se inspecciona mensualmente los accesorios de trasiego. Se inspecciona el programa de mantenimiento anual de válvulas y mangueras de trasiego	Cumplir con los pasos para el conectado y desconectado de la manguera criogénica del procedimiento de carga. Mejora del sistema de iluminación en zonas de carga (trasiego).
Asfixia (gas)	D	4	P/II	III	Uso adecuado de EPP. Capacitaciones sobre atmósferas con gases (LOX)	Procedimiento de carga, tener cuidado cuando se trabaj con gases (LOX)
Insolación, calambres, sofocación, hipotermia, temperatura extrema en la zona de carga (vajás temperaturas)	C	4	P	II	Control de horas trabajadas	Implementar vestimenta de frío en EPP
Incendios	C	5	P/II/E	III	Se verifica el procedimiento de carga. Se llevan a cabo periodicamente capacitaciones sobre los temas relacionados. Inspección de extintores. Inspección periódica de bombas de trasiego	Realizar simulacros en caso de incendios en la zona de carga. Conocer las rutas de escape en caso de incendios de gran proporción
Explosiones	A	5	P/II/E	III	Mantenimiento preventivo de unidades. Capacitación del personal en temas relacionados	Mejora de procedimiento de inspección de unidades. Capacitación mas frecuentes en uso de extintores. Conocer las rutas de escape
Mala visibilidad por exceso de oxigeno purgado al ambiente.	D	4	P	II	Plan de operacion preventiva de riesgo.	Llevar un control sobre el cumplimiento preventivo/correctivo de la operación, así como inspección por check list.
Contaminación del aire, suelo con residuo peligroso (combustible, aceite, grasas, etc)	C	3	P/II/E	II	Verificación del procedimiento de carga. Capacitación del personal. Mantenimiento preventivo de unidades en general	Capacitaciones sobre contaminación con residuos peligrosos
Problemas ergonómicos	C	2	P	I	Capacitaciones sobre ergonomía (movimiento y posturas para el uso de herramientas)	Implementación de fajas lumbares en EPP
Enfermedad del operador	B	1	P	I	Control de exámen médico ocupacional anual a los operadores	Plan de Gestión y Salud Ocupacional
Sismo	B	2	P/II/E	I	Verificación de riesgos asociados a los materiales peligrosos. Consideraciones Geograficas	Realizar un simulacro del plan de contingencia y plan manejo de crisis
Golpes y/o cortes con herramientas	C	2	P	I	Inspección de unidades verificando el buen estado de las herramientas, botiquines, EPP y botiquín. Capacitaciones de primeros auxilios	Uso adecuado de EPP. Verificar que las iluminarias estén en óptimas condiciones
IMPACTO	PROBABILIDAD		TIPO DE IMPACTO		NIVEL	
1.- Bajo 2.- Moderado 3.- Alto 4.- Muy alto 5.- Catastrófico	A.- Remoto B.- Poco probable C.- Posible D.- Probable E.- Frecuente		P.- Personas I.- Ambiente E.- Propiedad		I.- Accidente o incidente controlado por el operador con ayuda interna II.- Accidente o incidente controlado con ayuda externa. Se activa el plan de contingencia III.- Accidente ocasiona lesiones graves interviene ayuda externa. Se activa el plan de contingencia	

ENCUESTA

FECHA: 16/09/2014	HORA: 16:30
--------------------------	--------------------

1. DATOS GENERALES (Información de la Organización que responde el formulario)

1.1. Nombre completo de la Empresa u Organización:

Empresa Messer Gases Del Perú S.A

1.2. Ubicación (Localidad – Departamento):

Chimbote – Ancash

1.3. Nombre de la persona encuestada:

Ing. Jorge Luis Arévalo

2. PREGUNTAS

2.1 ¿Cree usted que será eficiente para las operaciones que se desarrolla en planta y a la vez beneficioso para la compañía?

Somos conscientes que en el área de despachos de Lox las perdidas por los trasiegos son potenciales de manera diaria y a lo largo de todo el mes, esto no se puede reducir por ser un sistema manual y por más capacitados que estén nuestros operadores criogénicos. Pero desde otro punto de vista como este por supuesto que si al ponerlo en práctica va a corregir y mejorar la operación y a la vez satisfactorio para la relación costo –beneficio para la compañía ya que controlamos y ahorramos mucho más producto que demos por perdido.

2.2 ¿Usted aprobaría la puesta en marcha de este proyecto?

Definitivamente sí, todo proyecto es aceptable y se aprueba siempre y cuando se resuelvan problemas mejorando el sistema y con ello beneficioso para la empresa aun periodo lo más corto posible.